

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales
Intensificación en Materiales

Efecto de la deformación en frío sobre la
microestructura y propiedades de un Acero

Autor: José Manuel Jiménez Arenas

Tutor: Laureano Soria Conde

Dep. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y
del Transporte
Ciencia de los Materiales e Ingeniería
Metalúrgica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales
Intensificación en Materiales

Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un Acero

Autor:

José Manuel Jiménez Arenas

Tutor:

Laureano Soria Conde

Profesor Titular de Universidad

Dep. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un Acero

Autor: José Manuel Jiménez Arenas

Tutor: Laureano Soria Conde

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a Don Laureano Soria Conde el permitirme abordar no solo este proyecto con su orientación y guía, sino también haberme dado la oportunidad trabajar en su empresa familiar, abriéndome un en el cual me han acogido muy bien.

Con sus continuos aleccionamientos y comentarios, me ayuda a ver cada vez más cerca mi objetivo de llegar a ser un buen ingeniero, por todo ello quedo eternamente agradecido.

También agradecer a mi otro jefe Don Manuel Periañez su continuo apoyo e interés en mi avance académico, así como los buenos ratos que hemos pasado en esas tardes y mañanas largas de mecanizado y ensayo que parecía que no tenían fin.

A la Señora directora del Centro de Ensayos químico-metalúrgicos, por ser tan amable y agradable conmigo siempre.

A Jesús, Miguel y sobre todo a Mercedes de nuestro Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales, por toda la ayuda y buen trabajo proporcionados.

A la Dra. Cristina Arévalo, al Dr. Jesús Cintas, al Dr. Yadir Torres, al Dr. Juan Manuel Montes, a Paloma, a Eva, a Otilio,... y a todos los demás profesores que seguro se me olvida alguno, no por ello menos importante, de los cuales he adquirido un conocimiento útil y práctico que me ayudará a desempeñar mi labor en el futuro, a todos ellos, muchísimas gracias.

Por último a mi novia, familia y amigos, por aguantarme todos estos años de carrera.

José Manuel Jiménez Arenas

Estudiante de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Sevilla, 2016

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se abordará de forma más práctica que teórica, los efectos de la deformación en frío en láminas de un acero al carbono. Dicha deformación se producirá por efecto de una laminación plana.

Dicha operación ocurre a escala mundial continuamente dada su amplia utilidad y aplicación en la industria.

Para abordar esta cuestión, en primer lugar se sentarán unas bases teóricas y a continuación unos ensayos y sus posteriores resultados para corroborar dicha teoría, acabando con unas conclusiones sobre esta práctica.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	9
Índice	11
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	15
1 Introducción	19
1.1 <i>Objetivo</i>	20
1.2 <i>Metales a estudio</i>	22
1.2.1 El Acero	22
1.2.2 El Aluminio	22
1.2.3 El Cobre	23
1.2.4 El Titanio	23
2 Producción de Acero	24
2.1 <i>Producción de Acero</i>	24
2.1.1 Materias Primas	24
2.1.2 Fabricación del hierro	24
2.1.3 Proceso de aceración	25
2.2 <i>Fundición de lingotes</i>	27
2.3 <i>Colada continua</i>	28
2.4 <i>Aceros al carbono y aleados</i>	30
2.4.1 Efectos de diversos elementos en los aceros	30
2.4.2 Elementos residuales en los aceros	32
2.4.3 Denominaciones de los aceros	32
2.4.4 Aceros al carbono	33
2.4.5 Aceros aleados	33
2.4.6 Aceros de alta resistencia y de baja aleación	34
2.4.7 Aceros bifásicos	34
2.5 <i>Aceros inoxidables</i>	35
2.6 <i>Aceros para matrices y herramientas</i>	37
2.6.1 Aceros de alta velocidad	37
2.6.2 Aceros para matrices	38
3 Proceso de Laminación	40
3.1 <i>Introducción</i>	40
3.2 <i>Proceso de laminación plana</i>	42
3.2.1 Reducción de la fuerza de laminado	43
3.3 <i>Consideraciones geométricas</i>	44
3.3.1 Ensanchado	44
3.3.2 Vibración y traqueteo	44
3.4 <i>Laminación en caliente</i>	45
3.5 <i>Defectos en placas y hojas laminadas</i>	46

3.6	<i>Otras características de los metales laminados</i>	47
3.6.1	Esfuerzos residuales	47
3.6.2	Tolerancias dimensionales.	47
3.6.3	Rugosidad de la superficie	47
3.6.4	Números de calibre	48
4	Trabajo en el laboratorio	49
4.1	<i>Preparación de probetas</i>	50
4.1.1	Dimensionado y corte	50
4.2	<i>Proceso de Deformación</i>	52
4.2.1	Equipo de Laminación	52
4.2.2	Laminación de las probetas de Acero	53
4.2.3	Laminación de probetas para comparación	56
4.3	<i>Estudio Metalográfico</i>	56
4.3.1	Extracción de Probetas	56
4.3.2	Empastillado, lijado, pulido y atacado.	56
4.3.3	Análisis micrográfico	56
4.3.4	Análisis macrográfico	65
4.4	<i>Estudio de Propiedades Mecánicas</i>	67
4.4.1	Extracción de Probetas de Tracción	67
4.4.2	Ensayo de Tracción	67
4.4.3	Análisis de resultados de ensayo de Tracción	68
4.4.4	Determinación de Durezas	70
5	Resultados y Conclusiones	74
5.1	<i>Resultados</i>	74
5.1.1	Acero	75
5.1.2	Acero inoxidable	77
5.1.3	Aluminio	78
5.1.4	Cobre	78
5.1.5	Titanio	79
5.2	<i>Conclusiones</i>	80
	Referencias	82
	ANEXO I: Gráficas de ensayos de tracción	84
I.1	<i>Acero al carbono sin deformar</i>	84
I.2	<i>Acero al carbono 1% de deformación</i>	85
I.3	<i>Acero al carbono 2% de deformación</i>	86
I.4	<i>Acero al carbono 3% de deformación</i>	87
I.5	<i>Acero al carbono 4% de deformación</i>	88
I.6	<i>Acero al carbono 5% de deformación</i>	89
I.7	<i>Acero al carbono 10% de deformación</i>	90
I.8	<i>Acero al carbono 15% de deformación</i>	91
I.9	<i>Acero al carbono 20% de deformación</i>	92
I.10	<i>Acero al carbono 25% de deformación</i>	93
I.11	<i>Acero al carbono 30% de deformación</i>	94
I.12	<i>Acero al carbono 35% de deformación</i>	95
I.13	<i>Acero al carbono 40% de deformación</i>	96
I.14	<i>Acero al carbono 45% de deformación</i>	97
I.15	<i>Acero al carbono 50% de deformación</i>	98
I.16	<i>Acero al carbono 55% de deformación</i>	99
I.17	<i>Acero al carbono 60% de deformación</i>	100
I.18	<i>Acero al carbono 65% de deformación</i>	101
I.19	<i>Acero al carbono 70% de deformación</i>	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Producción mundial de acero en miles de toneladas. [1]	19
Tabla 1.2. Trabajo en frío. [23]	20
Tabla 2.1. Selección típica de aceros al carbono y aleados para diversas aplicaciones. [4]	30
Tabla 2.2. Propiedades mecánicas características de aceros al carbono y aleados seleccionados, en condiciones de laminado en caliente, normalizado y recocido. [4]	33
Tabla 2.3. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidosseleccionados. [4]	36
Tabla 2.4. Tipos básicos de aceros para matrices y herramientas. [4]	37
Tabla 2.5. Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramientas. [4]	38
Tabla 2.6. Materiales típicos para matrices y herramental para trabajo de los metales [4]	38
Tabla 4.1. Composición química del acero estudiado.	49
Tabla 4.2. Dimensiones de las probetas, en milímetros	51
Tabla 4.3. Reducción de espesor deseada.	53
Tabla 4.4. Reducción obtenida.	53
Tabla 4.5. Dimensiones de las probetas antes y tras laminación, en milímetros.	54
Tabla 4.6. Resultados de ensayos de tracción.	68
Tabla 4.7. Resultados de ensayos de dureza.	70
Tabla 4.8. Dureza vickers del cobre.	72
Tabla 4.9. Dureza vickers del titanio.	72
Tabla 4.10. Dureza vickers del aluminio.	72
Tabla 4.11. Dureza vickers del acero inoxidable.	72
Tabla 5.1. Resultados de ensayos.	74
Tabla A.1. Propiedades Mecánicas, 0% de reducción de espesor.	84
Tabla A.2. Propiedades Mecánicas, 1% de reducción de espesor.	85
Tabla A.3. Propiedades Mecánicas, 2% de reducción de espesor.	86
Tabla A.4. Propiedades Mecánicas, 3% de reducción de espesor.	87
Tabla A.5. Propiedades Mecánicas, 4% de reducción de espesor.	88
Tabla A.6. Propiedades Mecánicas, 5% de reducción de espesor.	89
Tabla A.7. Propiedades Mecánicas, 10% de reducción de espesor.	90
Tabla A.8. Propiedades Mecánicas, 15% de reducción de espesor.	91
Tabla A.9. Propiedades Mecánicas, 20% de reducción de espesor.	92
Tabla A.10. Propiedades Mecánicas, 25% de reducción de espesor.	93
Tabla A.11. Propiedades Mecánicas, 30% de reducción de espesor.	94
Tabla A.12. Propiedades Mecánicas, 35% de reducción de espesor.	95

Tabla A.13. Propiedades Mecánicas, 40% de reducción de espesor.	96
Tabla A.14. Propiedades Mecánicas, 45% de reducción de espesor.	97
Tabla A.15. Propiedades Mecánicas, 50% de reducción de espesor.	98
Tabla A.16. Propiedades Mecánicas, 55% de reducción de espesor.	99
Tabla A.17. Propiedades Mecánicas, 60% de reducción de espesor.	100
Tabla A.18. Propiedades Mecánicas, 65% de reducción de espesor.	101
Tabla A.19. Propiedades Mecánicas, 70% de reducción de espesor.	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Línea de evolución de la producción de Acero. [1]	19
Figura 1.2. Láminas de metales estudiados.	21
Figura 1.3. Micrografías correspondientes a la figura 1 de metales estudiados.	21
Figura 1.4. Productos de acero. [6]	22
Figura 1.5. Lingotes de aluminio. [7]	22
Figura 1.6. Hilos de cobre. [8]	23
Figura 1.7. Titanio. [9]	23
Figura 2.1. Esquema del alto horno. [4]	25
Figura 2.2. Esquema de los tipos de hornos eléctricos: (a) de arco directo, (b) de arco indirecto, y (c) de inducción. [4]	26
Figura 2.3. Esquemas que muestran la carga, fusión y el vaciado del hierro fundido en un proceso básico de oxígeno. [4]	27
Figura 2.4. (a) Proceso de colada continua para acero. (b) Fundición continua de cinta metálica no ferrosa. [4]	29
Figura 3.1. Esquema de diversos procesos de laminación plana y laminación de forma. [4]	40
Figura 3.2. Secciones. [10]	41
Figura 3.3. Rollos laminados en caliente y en frío respectivamente. [11][12]	42
Figura 3.4. (a) Esquema del proceso de laminación plana. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. (c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. [4]	42
Figura 3.5. Esquema de diversos arreglos de rodillos: (a) molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características.; (b) molino de dos rodillos; (c) molino de tres rodillos, y (d) molino de laminación de conjunto (o Sendzimir). [4]	43
Figura 3.6. Cambios en la estructura de los granos de metales fundidos o maleables de granos grandes durante el laminado en caliente. [4]	46
Figura 3.7. (a) Método de nivelación de rodillos para aplanar hojas laminadas. (b) Nivelación de rodillos para enderezar barras estiradas. [4]	46
Figura 3.8. Esquema de defectos típicos en laminación plana: (a) bordes ondulados; (b) grietas en forma de cremallera en el centro de la cinta; (c) grietas de los bordes y (d) acocodrilado. [4]	47
Figura 3.9. (a) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro pequeño. (b) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro grande.[4]	48
Figura 4.1. Pieza de acero tras ensayo de determinación de composición química.	49
Figura 4.2. Marcado y corte.	50
Figura 4.3. Probetas antes de rectificar y rectificadora en proceso.	50
Figura 4.4. Probetas tras rectificado.	50

Figura 4.5. Vista de probetas rectificadas.	51
Figura 4.6. Laminadora de pequeña capacidad.	51
Figura 4.7. Vistas de laminadora.	52
Figura 4.8. Gráfica de reducción de espesor.	54
Figura 4.9. Gráfica de cambio de dimension transversal.	55
Figura 4.10. Gráfica de cambio de dimension longitudinal.	55
Figura 4.11. Micrografías de probetas sin deformar.	57
Figura 4.12. Micrografías de difernetes probetas para cada porcentaje de laminación, cara longitudinal.	58
Figura 4.13. Micrografías de difernetes probetas para cada porcentaje de laminación, cara lateral-transversal.	59
Figura 4.14. Micrografías de difernetes probetas para cada porcentaje de laminación, sección transversal, junto con macografías de la sección transversal en todos los estados de laminación.	60
Figura 4.15. Micrografías de lámina de Acero inoxidable austenítico (AISI304) en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.	61
Figura 4.16. Micrografías de lámina de aluminio en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.	62
Figura 4.17. Micrografías de lámina de cobre en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.	63
Figura 4.18. Micrografías de lámina de titanio en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.	64
Figura 4.19. Vista de probetas en los diferentes estados de laminación, de 0% a 30%.	65
Figura 4.20. Vista de probetas en los diferentes estados de laminación, de 35% a 70%.	65
Figura 4.21. Macrografia de la sección transversal en orden descendente de reducción de espesor.	66
Figura 4.22. Vista de probetas para ensayo de tracción.	67
Figura 4.23. Vista de probetas para ensayo de tracción, una para cada estado de laminación.	67
Figura 4.24. Gráfica que muestra la evolución del alargamiento con la reducción de espesor.	69
Figura 4.25. Gráfica que muestra la evolución del límite elástico con la reducción de espesor.	69
Figura 4.26. Gráfica que muestra la evolución de la carga máxima con la reducción de espesor.	69
Figura 4.27. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en las 3 caras del acero.	70
Figura 4.28. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara longitudinal del acero.	71
Figura 4.29. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara transversal del acero.	71
Figura 4.30. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara lateral-transversal del acero.	71
Figura 4.31. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, cara longitudinal.	73
Figura 4.32. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, cara transversal.	73
Figura 4.33. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, caralateral- transversal.	73
Figura 5.1. Gráfica de comparación de propiedades.	75

Figura A.1. Gráfica de ensayo de tracción 0% reducción de espesor.	84
Figura A.2. Gráfica de ensayo de tracción 1% reducción de espesor.	85
Figura A.3. Gráfica de ensayo de tracción 2% reducción de espesor.	86
Figura A.4. Gráfica de ensayo de tracción 3% reducción de espesor.	87
Figura A.5. Gráfica de ensayo de tracción 4% reducción de espesor.	88
Figura A.6. Gráfica de ensayo de tracción 5% reducción de espesor.	89
Figura A.7. Gráfica de ensayo de tracción 10% reducción de espesor.	90
Figura A.8. Gráfica de ensayo de tracción 15% reducción de espesor.	91
Figura A.9. Gráfica de ensayo de tracción 20% reducción de espesor.	92
Figura A.10. Gráfica de ensayo de tracción 25% reducción de espesor.	93
Figura A.11. Gráfica de ensayo de tracción 30% reducción de espesor.	94
Figura A.12. Gráfica de ensayo de tracción 35% reducción de espesor.	95
Figura A.13. Gráfica de ensayo de tracción 40% reducción de espesor.	96
Figura A.14. Gráfica de ensayo de tracción 45% reducción de espesor.	97
Figura A.15. Gráfica de ensayo de tracción 50% reducción de espesor.	98
Figura A.16. Gráfica de ensayo de tracción 55% reducción de espesor.	99
Figura A.17. Gráfica de ensayo de tracción 60% reducción de espesor.	100
Figura A.18. Gráfica de ensayo de tracción 65% reducción de espesor.	101
Figura A.19. Gráfica de ensayo de tracción 70% reducción de espesor.	102

1 INTRODUCCIÓN

La producción metalúrgica ha ido en aumento a escala mundial desde la revolución industrial. Ya sea en lingotes, barras, placas o vigas acabadas, el acero es un elemento básico en la sociedad moderna y un claro indicador del desarrollo de un país.

La producción mundial de acero en miles de toneladas y su línea de evolución:

Tabla 1.1. Producción de mundial de acero en miles de toneladas. [1]

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1062541	1147805	1250107	1348122	1343269	1238285	1432761	1537206	1559472	1649303

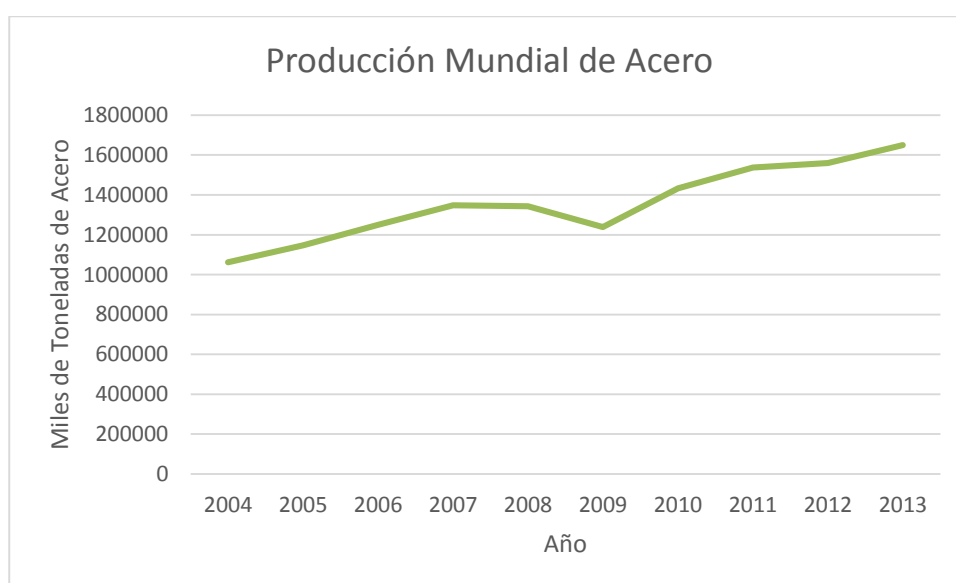


Figura 1.1. Línea de evolución de la producción de Acero. [1]

Dada la creciente demanda metalúrgica, las investigaciones en la obtención, fabricación, tratamientos y acabados en el acero son cada vez más, dándose cada poco tiempo la introducción de nuevas aleaciones con características nuevas y útiles para aplicaciones muy variadas.

También en otros metales y aleaciones, beneficiándose de sus naturalezas de peso reducido, como pueden ser el aluminio y el titanio, pero sin sacrificar propiedades necesarias para su cometido.

Una de las prácticas más extendidas es la del **trabajo en frío**, por su operación, economía y resultados obtenidos, es vital en la industria actual y ampliamente extendida por todo el mundo.

El trabajo en frío o endurecimiento por deformación, es el proceso de aumento de resistencia de un metal por deformación plástica. La deformación plástica se produce cuando un material se altera más allá de su región de elasticidad. Esta se puede llevar a cabo por varios métodos tales como: laminado, trefilado, prensado, etc. (Tabla 1.2)

El trabajo en frío es de gran importancia porque permite a un usuario alterar las propiedades mecánicas del material para obtener las deseadas. No sólo afecta a la dureza del material, sino también: el límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad.

Estos procesos son de gran utilidad, ya que no requiere ningún calentamiento, disminuye el coste de endurecer el material. El trabajo en frío es un método muy viable en conclusión. [24]

Tabla 1.2. Trabajo en Frío. [23]

Squeezing (Presión, Embutición)	Bending	Shearing	Drawing
Rolling (Laminación)	Angle	Slitting (Corte)	Tube drawing (Trefilado)
Swaging (Estampación)	Roll	Blanking (Sobranante)	Wire drawing
Cold Forging (Forja)	Roll forming	Piercing (Perforado)	Spinning (Forma contorno)
Sizing (Estampación)	Drawing	Lancing (Punción)	Embossing (Grabado)
Extrusion	(Trefilado)	Perforating	Stretch forming (Doblado)
Riveting (Remachado)	Seaming (Union)	Notching(Entallado)	Shell drawing
Staking	Flanging (Doblado	Nibbling (Corte)	Ironing (Extrusion impacto)
Coining	bordes)	Shaving (Viruta)	High-energy rate forming
Peening (Granallado)	Straightening	Trimming (Recorte)	
Bunishing	(Enderezar)	Cutoff	
Die Hobbing		Dinking	
Thread rolling		(Punzonado)	

1.1 Objetivo

En el presente trabajo, se procederá al estudio de las propiedades mecánicas de un acero al carbono en su deformación en frío. También se expondrán a modo de comparativa, deformaciones en frío de un aluminio, un cobre, un titanio y un acero inoxidable, todos ellos ampliamente extendidos.

Se comenzará en primer lugar con contenido teórico sobre la producción y tipos de acero en el punto 2, seguido del proceso de laminación, punto 3.

En el punto 4 se abordará el trabajo en laboratorio, donde se estudiará la preparación de las probetas, proceso de deformación, estudio metalográfico y estudio de propiedades mecánicas.

Para finalizar, en el unto 5 se presentarán los resultados y las conclusiones del trabajo.

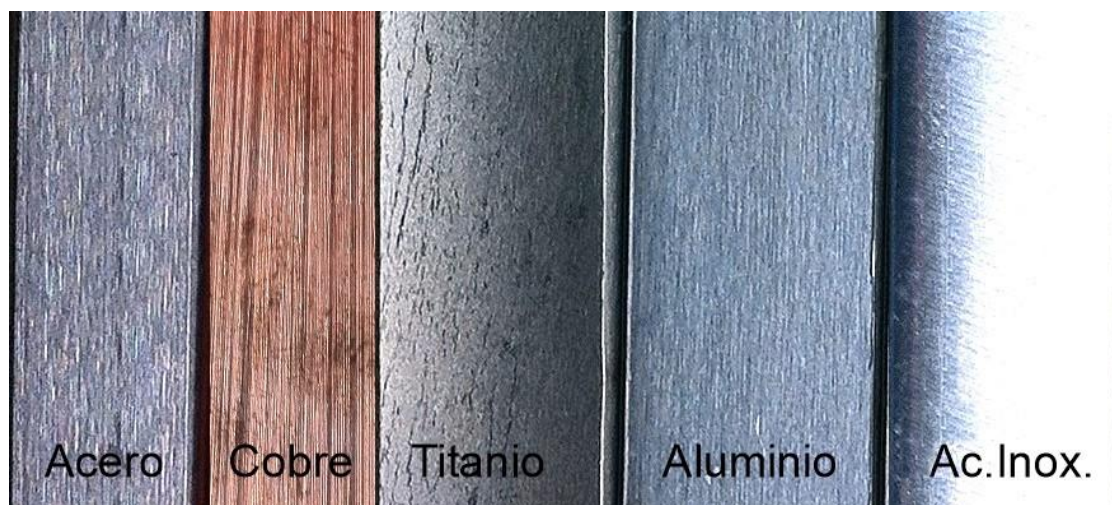


Figura 1.2. Láminas de metales estudiados.



Figura 1.3. Micrografías correspondientes a la figura 1 de metales estudiados.

1.2 Metales a estudio

1.2.1 El Acero

El acero es un metal compuesto de hierro más cantidades variables de carbono, así como otros elementos tales como cromo, níquel, molibdeno, circonio, vanadio, tungsteno...

Los diferentes tipos de acero - es decir, con diferentes propiedades y características - se producen por el ajuste de la composición química y la adaptación de cualquiera de las diferentes etapas del proceso de fabricación, tales como laminación, acabado y tratamiento térmico.

Como cada uno de estos factores puede ser modificado, no hay límite para el número de diferentes aceros que se pueden fabricar.

Actualmente hay más de 3.000 grados catalogados disponibles (composiciones químicas) de acero, sin contar los creados para satisfacer la demanda de encargo, que van desde los grados básicos (vías de tren) a sofisticados de alta aleación y acero inoxidable para aplicaciones especializadas [2].

A medida que aumenta el número de operaciones para producir una pieza, ocurre lo mismo con su coste y, por consiguiente, con todo el producto.

Para reducir el costo, los fabricantes aplican los conceptos de la fabricación “cerca de la forma neta”, con los que el producto se forma con el menor número de operaciones [3].



Fig. 1.4 Productos de acero. [6]



Fig. 1.5 Lingotes de aluminio. [7]

1.2.2 El Aluminio

Es un metal no ferromagnético y el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8 % de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas.

En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería de materiales, tales como su baja densidad (2700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa).

Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es muy barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero.

Es un material blando (escala de Mohs: 2-3-4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de $160\text{-}200 \text{ N/mm}^2$ ($160\text{-}200 \text{ MPa}$). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura. [3][5]

1.2.3 El Cobre

Se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, se caracteriza por ser uno de los mejores conductores de electricidad (el segundo después de la plata). Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

Tanto el cobre como sus aleaciones tienen una buena maquinabilidad, es decir, son fáciles de mecanizar. El cobre posee muy buena ductilidad y maleabilidad lo que permite producir láminas e hilos muy delgados y finos. Es un metal blando, con un índice de dureza 3 en la escala de Mohs (50 en la escala de Vickers) y su resistencia a la tracción es de 210 MPa, con un límite elástico de 33,3 MPa.² Admite procesos de fabricación de deformación como laminación o forja, y procesos de soldadura y sus aleaciones adquieren propiedades diferentes con tratamientos térmicos como temple y recocido. En general, sus propiedades mejoran con bajas temperaturas lo que permite utilizarlo en aplicaciones criogénicas. [3][5]



Fig. 1.6 Hilos de cobre. [8]



Fig. 1.7 Titanio. [9]

1.2.4 El Titanio

Se trata de un metal de transición de color gris plata. Comparado con el acero, es mucho más ligero (4,5/7,8). Tiene alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica, pero es mucho más costoso, lo cual limita sus usos industriales.

Es un metal abundante en la naturaleza; se considera que es el cuarto metal estructural más abundante en la superficie terrestre y el noveno en la gama de metales industriales. No se encuentra en estado puro sino en forma de óxidos, en la escoria de ciertos minerales de hierro. Su utilización se ha generalizado con el desarrollo de la tecnología aeroespacial, donde es capaz de soportar las condiciones extremas de frío y calor que se dan en el espacio y en la industria química, por ser resistente al ataque de muchos ácidos; asimismo, este metal tiene propiedades biocompatibles, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia, por lo que es factible la fabricación de muchas prótesis e implantes de este metal.

Entre las características mecánicas del titanio se tienen las siguientes:

- Mecanizado por arranque de viruta similar al acero inoxidable.
- Maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Dúctil, permite la fabricación de alambre delgado.
- Permite la fabricación de piezas por fundición y moldeo.
- Gran tenacidad, material soldable, muy resistente a la tracción, Duro (Escala de Mohs 6)
- Permite varias clases de tratamientos tanto termoquímicos como superficiales. [3][5]

2 PRODUCCIÓN DE ACERO

2.1 Producción de Acero

2.1.1 Materias Primas

Los tres materiales básicos que se utilizan en la fabricación de hierro y acero son el mineral de hierro, la piedra caliza y el coque. Aunque no siempre aparece en estado libre en la naturaleza, el hierro es uno de los elementos más abundantes en el mundo, pues constituye alrededor de 5% de la corteza terrestre (en la forma de diversos minerales). Los principales minerales de hierro son la taconita (una roca negra similar al sílex), la hematita (un mineral de óxido de hierro) y la limonita (un óxido de hierro que contiene agua). [4]

Una vez que se extrae de la mina, el mineral se tritura en finas partículas, se le retiran las impurezas por diversos medios (como la separación magnética) y se le da forma de pellets, bolas o briquetas, mediante agua y diferentes aglutinantes. Los pellets son aproximadamente 65% hierro puro y tienen un diámetro de unos 25 mm (1 pulgada). Al mineral de hierro concentrado se le conoce como beneficiado (al igual que otros minerales concentrados). Algunos minerales ricos en hierro se utilizan directamente, sin aglutinar. [4]

El coque se obtiene de grados especiales de carbón bituminoso (un carbón suave rico en hidrocarburos volátiles y en materia alquitranada), que se calienta en hornos verticales a temperaturas de hasta 1150 °C (2100 °F) y después se enfrían con agua en torres de enfriamiento. Tiene varias funciones en la fabricación del acero, incluyendo (a) generar el nivel de calor requerido para que ocurran las reacciones químicas necesarias en la producción del hierro, y (b) producir el monóxido de carbono (un gas reductor, lo que significa que retira oxígeno) que se utiliza así para reducir el óxido de hierro a hierro. [4]

Los productos químicos derivados del coque se emplean para elaborar plásticos y compuestos químicos. Los gases emitidos durante la conversión del carbón en coque se utilizan como combustible en las operaciones de la planta. [4]

La función de la piedra caliza (carbonato de calcio) es retirar impurezas del hierro fundido, pues reacciona químicamente con ellas y actúa como fundente (esto es, fluye como un fluido), lo cual hace que se fundan a baja temperatura. La piedra caliza se combina con las impurezas y forma una escoria (ligera), que flota sobre el metal fundido y se retira después. También se utiliza como fundente la dolomita (un mineral de carbonato de magnesio y calcio). La escoria se utiliza en la fabricación de cemento, fertilizantes, vidrio, materiales de construcción, aislamiento de lana mineral y para relleno de caminos. [4]

2.1.2 Fabricación del hierro

Las tres materias primas descritas antes se transportan hasta la parte superior de un alto horno (fig. 2.1) y se depositan dentro de él (a lo que se denomina cargar el horno). Éste es básicamente un gran cilindro de acero revestido con ladrillo refractario (resistente al calor); tiene la altura de un edificio de 10 pisos. El principio de este horno se desarrolló en Europa central. El primer alto horno se construyó en Estados Unidos y comenzó a operar en 1621. La mezcla de carga se funde en una reacción a 1650 °C (3000 °F) con el aire precalentado a unos 1100 °C (2000 °F) e inyectado dentro del horno (de ahí el término “horno de inyección” también utilizado para este reactor) mediante boquillas (llamadas toberas). Aunque pueden ocurrir muchas reacciones, la reacción básica es la del oxígeno con el carbono para producir monóxido de carbono, que a su vez reacciona con el óxido de hierro y lo reduce a hierro. Es necesario precalentar el aire de entrada porque el quemado exclusivo del coque no produce temperaturas lo suficientemente altas para que ocurran estas reacciones. [4]

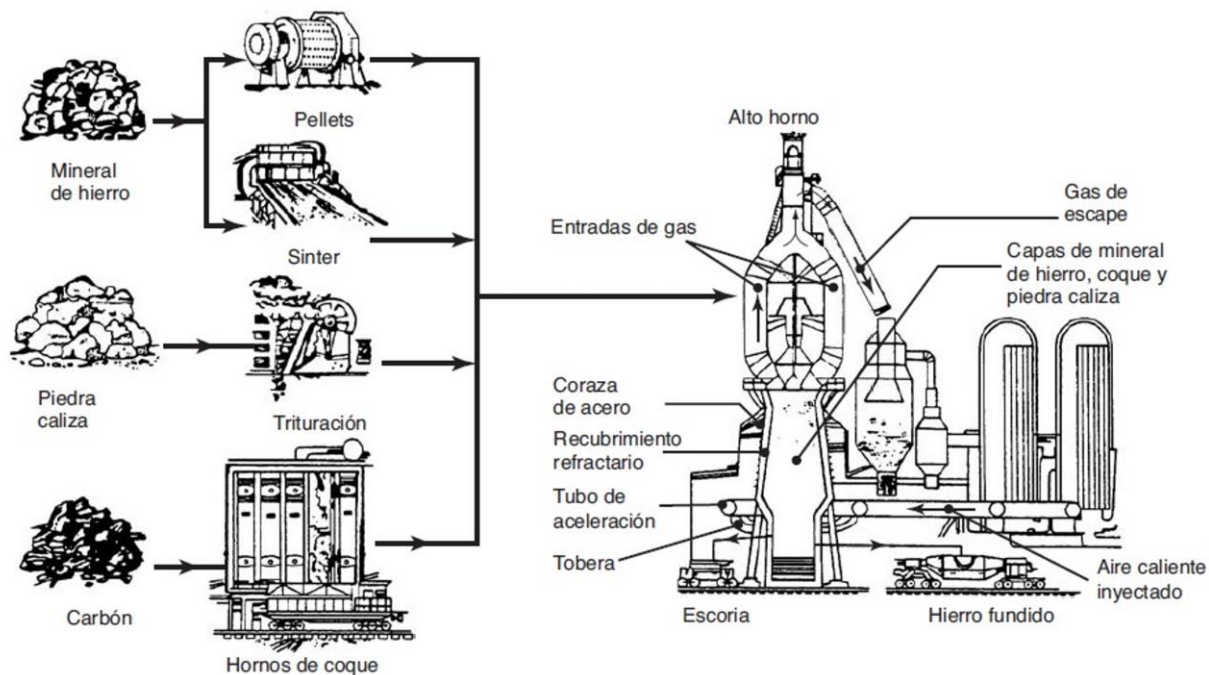


Figura 2.1. Esquema del alto horno. [4]

El metal fundido se acumula en el fondo del alto horno, mientras que las impurezas flotan arriba de él. A intervalos de cuatro a cinco horas, se extrae (sangra) el metal en carros olla, con hasta 160 toneladas de hierro fundido cada uno de ellos. El metal fundido en esta etapa se llama arrabio o hierro cochino, o simplemente metal caliente; tiene una composición característica de 4% de C, 1.5% de Si, 1% de Mn, 0.04% de S, 0.4% de P, y el resto es hierro puro. La palabra cochino proviene de las prácticas iniciales de verter el metal fundido en pequeños moldes de arena arreglados como una camada de cochinos alrededor de un canal principal. El metal solidificado (arrabio) se utiliza después para fabricar hierro y aceros. [4]

2.1.3 Proceso de aceración

El acero se produjo por primera vez en China y Japón entre los años 600 y 800 d.C. El proceso de su fabricación consiste fundamentalmente en refinar el arrabio reduciendo el porcentaje de manganeso, silicio, carbono y otros elementos mediante el control de la composición del producto con la adición de varios elementos. [4]

El metal fundido que procede del alto horno se transporta a uno de tres tipos de hornos: de hogar abierto, eléctrico o básico de oxígeno. El nombre de “hogar abierto” deriva de la forma poco profunda del hogar que se abre directamente a las flamas que funden el metal. [4]

Desarrollado durante la década de 1860, el horno de hogar abierto aún es importante en la industria, pero ha sido reemplazado por los hornos eléctricos y por el proceso básico de oxígeno, que son más eficientes y producen aceros de mejor calidad. [4]

Horno eléctrico. La fuente de calor de este horno es un arco eléctrico continuo que se forma entre los electrodos y el metal cargado en el horno (figs. 2.2 a y b). En este tipo de aparatos se generan temperaturas tan altas como 1925 °C (3500 °F). [4]

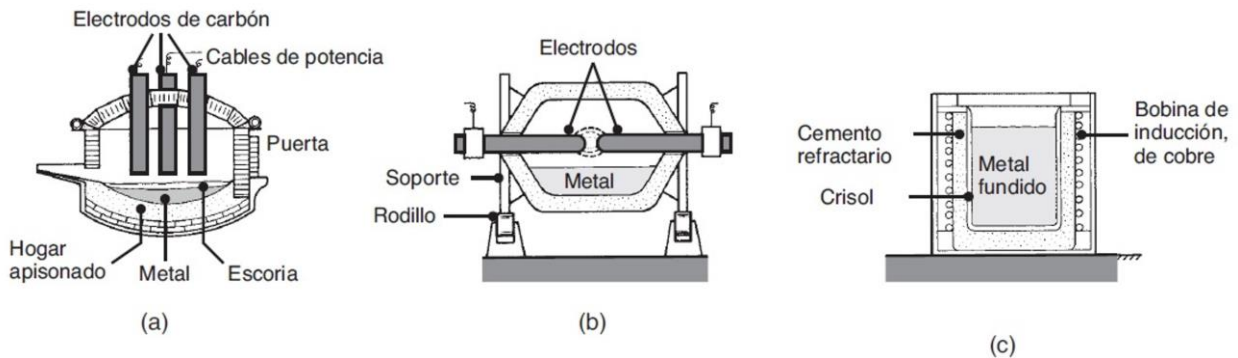


Figura 2.2. Esquema de los tipos de hornos eléctricos: (a) de arco directo, (b) de arco indirecto, y (c) de inducción. [4]

En general existen tres electrodos de grafito, que pueden llegar a ser de 750 mm (30 pulgadas) de diámetro y de 1.5 m a 2.5 m (5 a 8 pies) de largo; su altura dentro del horno se puede ajustar en respuesta a la cantidad de metal presente y a la medida del desgaste de los electrodos. [4]

Primero se deja caer chatarra de acero y una pequeña cantidad de carbón y piedra caliza dentro del horno eléctrico, a través del techo abierto. Después éste se cierra y se bajan los electrodos. Una vez que se enciende el horno, el metal se funde en unas dos horas. [4]

Luego se corta la corriente, se elevan los electrodos, se balancea el horno y el metal fundido se vierte en una olla, que es un receptáculo utilizado para transferir y colar el metal fundido. Las capacidades de los hornos eléctricos varían de 60 a 90 toneladas de acero por día. [4]

La calidad del acero producido es mejor que la del horno de hogar abierto y que la del proceso básico de oxígeno. Para cantidades menores, los hornos eléctricos pueden ser del tipo de inducción. El metal se coloca en un crisol, un recipiente grande fabricado con material refractario y rodeado con una bobina de cobre por la que se hace pasar corriente alterna (fig. 2.2c). [4]

La corriente inducida en la carga genera calor y funde el metal. Estos hornos también se utilizan para refundir el metal para fundición. [4]

Convertidor básico de oxígeno. El convertidor básico de oxígeno (BOF, por sus siglas en inglés) es el proceso de fabricación de acero más rápido. En general, se cargan 200 toneladas de arrabio y 90 toneladas de chatarra en un recipiente (fig. 2.3).

Después se inyecta oxígeno puro dentro del horno por alrededor de 20 minutos mediante una lanza (un tubo largo) enfriada por agua, a una presión de unos 1250 kPa (180 psi), como se muestra en la figura 4. Se agregan agentes fundentes (como piedra caliza) a través de una rampa. La vigorosa agitación del oxígeno refina el metal fundido mediante un proceso de oxidación en el que se produce óxido de hierro. El óxido reacciona con el carbono en el metal fundido, produciendo monóxido y bióxido de carbono.

Después se retrae la lanza y se drena el horno balanceándolo (obsérvese la abertura en la fig. 6 para el metal fundido). La escoria se retira balanceando el horno en la dirección opuesta.

El proceso BOF es capaz de refinar 250 toneladas de acero en un tiempo de entre 30 y 50 minutos. La mayoría de los aceros BOF, que tienen niveles bajos de impurezas y son de mejor calidad que los aceros de hornos de hogar abierto, se procesan como placas, láminas y diversas formas estructurales, por ejemplo, vigas I y canales. [4]

Horno de vacío. También se puede fundir acero en hornos de inducción de los que se ha retirado el aire, similares al mostrado en la figura 3 c. Debido a que el proceso retira las impurezas gaseosas del metal fundido, la fundición al vacío produce aceros de alta calidad. [4]

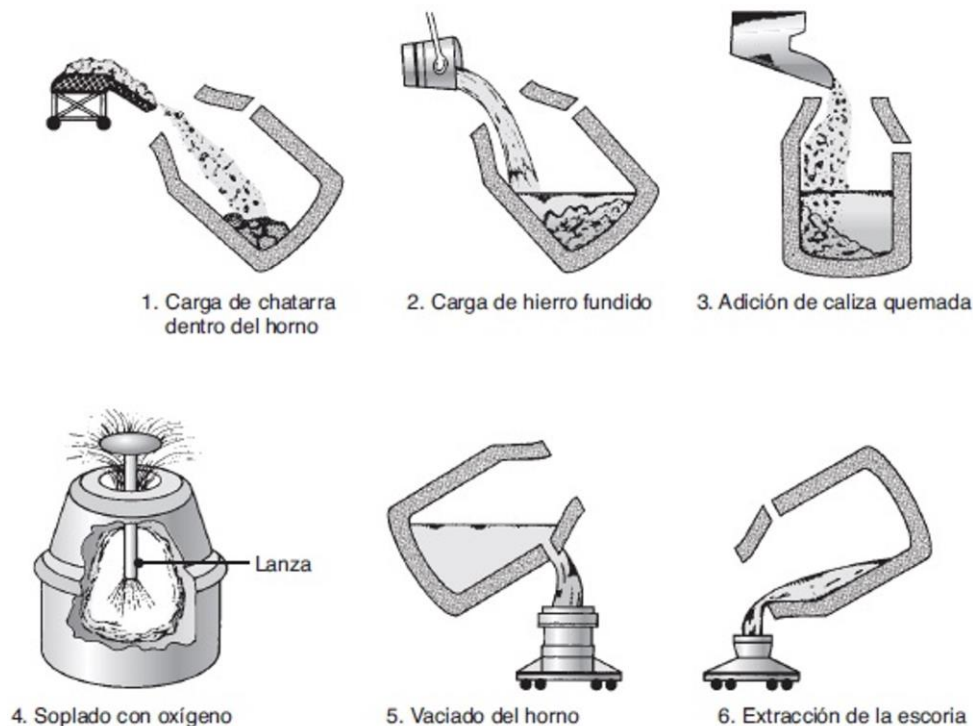


Figura 2.3. Esquemas que muestran la carga, fusión y el vaciado del hierro fundido en un proceso básico de oxígeno. [4]

2.2 Fundición de lingotes

Tradicionalmente, el siguiente paso en el proceso de producción de acero consiste en formar el metal fundido en formas sólidas (lingote) para su procesamiento posterior, como laminado a formas determinadas, fundición en formas semiacabadas o para forjarlo.[4]

Hoy este proceso se reemplaza en gran medida por la colada continua, que mejora la eficiencia al eliminar la necesidad de los lingotes. El metal fundido se vierte (cuela) de la olla a los moldes de los lingotes, o lingoteras, en los que se solidifica el metal. En general, las lingoteras se fabrican de hierro de cubilote o hierro de alto horno con 3.5% de C. Son cónicos para facilitar la remoción del metal solidificado. [4]

El fondo puede ser cerrado o abierto; si es abierto, se colocan sobre una superficie plana. Los lingotes enfriados se retiran (extraen) de los moldes y se introducen en hornos de empape, donde se recalientan a una temperatura uniforme de unos 1200 °C (2200 °F) para su procesamiento posterior mediante laminado. Los lingotes pueden ser de sección transversal cuadrada, rectangular o redonda y sus pesos van desde unos cuantos kilos hasta 40 toneladas. [4]

Durante la solidificación de un lingote ocurren ciertas reacciones, que influyen de modo importante en la calidad del acero producido. Por ejemplo, al fabricar el acero se pueden disolver cantidades significativas de oxígeno y otros gases en el metal fundido. [4]

La mayoría de estos gases son expulsados cuando el metal se solidifica, ya que su límite de solubilidad en el metal disminuye abruptamente al disminuir su temperatura. El oxígeno expulsado se combina con carbono para formar monóxido de carbono, que provoca porosidad en el lingote solidificado. [4]

Según la cantidad de gas desarrollado durante la solidificación, se pueden producir tres tipos de lingotes de acero: calmado, semicalmado y efervescente. [4]

1. **Acero calmado.** Éste es un acero totalmente desoxidado; esto es, se retira el oxígeno eliminando así la porosidad. En el proceso de desoxidación, el oxígeno disuelto en el metal fundido se hace reaccionar con elementos como aluminio, silicio, manganeso y vanadio, que deben agregarse al metal fundido. Estos elementos tienen afinidad con el oxígeno y forman óxidos metálicos. Si se utiliza aluminio, al producto se le llama acero calmado en aluminio. El término calmado se refiere a que el acero queda quieto después de colarse en el molde. [4]

Las inclusiones de óxido en el baño fundido (si son lo suficientemente grandes) flotan y se adhieren a (o se disuelven en) la escoria. Por lo tanto, un acero calmado por completo carece de cualquier porosidad provocada por gases; tampoco tiene sopladuras (agujeros esféricos grandes cerca de las superficies del lingote). En consecuencia, las propiedades químicas y mecánicas de un lingote de acero calmado son relativamente uniformes en toda la masa. Sin embargo, debido a la contracción durante la solidificación, un lingote de este tipo desarrolla un rehepe en la parte superior (también denominada cavidad por contracción). Tiene la apariencia de un embudo y puede consumir un volumen sustancial del lingote, ya que debe cortarse y manejarse como chatarra. [4]

2. **Acero semicalmado.** El acero semicalmado es un acero parcialmente desoxidado. Contiene alguna porosidad (por lo general en la sección central superior del lingote), aunque muy poco, o ningún, rehepe. El resultado es que se reduce el desperdicio. Aunque el rehepe en el acero semicalmado es menor, esta ventaja se ve superada por la presencia de porosidad en esa región. La producción de los aceros semicalmados es económica. [4]

3. **Acero efervescente.** En un acero efervescente, que en general tiene un contenido bajo de carbono (menos de 0.15%), los gases desarrollados se calman (o controlan) parcialmente mediante la adición de otros elementos, como el aluminio. Los gases producen sopladuras a lo largo del anillo exterior del lingote, de aquí el término efervescente. Los aceros efervescentes tienen poco o ningún rehepe y poseen una superficie dúctil con un buen acabado superficial. Además, las impurezas y las inclusiones tienden a segregarse hacia el centro del lingote. Por lo tanto, los productos fabricados con este acero pueden resultar defectuosos y debe inspeccionarse. [4]

Refinación. Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones ferrosas se ven afectadas adversamente por la cantidad de impurezas, inclusiones y otros elementos presentes. A la remoción de impurezas se le conoce como refinación. La mayor parte de la refinación se efectúa en hornos de fusión o en ollas por medio de la adición de diversos elementos. Existe una demanda creciente por aceros más limpios, que tienen mejores y más uniformes propiedades y una composición con mayor consistencia.

La refinación es importante, sobre todo al producir aceros y aleaciones de alto grado para aplicaciones críticas y de alto desempeño, como los componentes para aeronaves. Además, los periodos de garantía de flechas, árboles de levas, cigüeñales para camiones a diésel y partes similares se pueden incrementar de modo significativo utilizando aceros de mayor calidad. Estos aceros se someten a una refinación secundaria en ollas (metalurgia de olla) y a la refinación en ollas (refinación por inyección), que por lo general consiste en fundir y procesar el acero en vacío.

Se han desarrollado varios procesos mediante atmósferas controladas (como la fusión por haz de electrones, la refusión por arco al vacío, la descarburización argón-oxígeno y la refusión de doble electrodo por arco al vacío). [4]

2.3 Colada continua

Las ineficiencias y los problemas implícitos en la fabricación tradicional de acero en lingotes se remedian mediante procesos de colada continua, que producen metal de mejor calidad a costos. Concebida en la década de 1860, la colada continua, o **fundición en hilos**, se desarrolló inicialmente para fundir tiras de metales no ferrosos. Ahora el proceso se utiliza ampliamente para producir acero, con mejoras importantes en la productividad y reducción de costos. En la figura 2.4 se muestra de modo esquemático un sistema para colada continua. [4]

El metal fundido en la olla se limpia y luego se iguala su temperatura soplando gas nitrógeno a través de él durante cinco o diez minutos. Después se vierte en un recipiente intermedio de colada, revestido de refractario (**distribuidor**), donde se retiran las impurezas. El distribuidor contiene hasta tres toneladas de acero. El metal fundido se mueve hacia abajo a través de moldes de cobre enfriados por agua y se comienza a solidificar en una trayectoria soportada por rodillos (llamados rodillos de apriete). [4]

Antes de iniciar el proceso de colada, se inserta una barra inicial (barra ficticia) en el fondo del molde. Cuando se cuela el metal fundido se solidifica sobre dicha barra, la cual se retira a la misma velocidad que a la que se vierte el metal. [4]

La velocidad de enfriamiento es tanta que el metal desarrolla una superficie exterior solidificada (costra) que lo soporta durante su recorrido hacia abajo, de manera característica a unos 25 mm/s (1 pulgada/s). El espesor de la costra en el extremo de salida del molde es de entre 12 mm a 18 mm (0.5 a 0.75 pulgadas). Se provee enfriamiento adicional mediante rociado de agua a lo largo de la trayectoria del metal que está solidificándose. [4]

En general, los moldes se recubren con grafito o con lubricantes sólidos similares para reducir tanto la fricción como la adhesión en las interfaces molde-metal. De igual manera, se someten a vibración para disminuir la fricción y el pegado. [4]

El metal colado se puede cortar a menudo en las longitudes deseadas mediante cizallamiento o corte por soplete controlado por computadora, o es posible alimentar directamente un molino de rodillos a fin de reducir después el espesor y darle forma de productos como canales y vigas I. Además de costar menos, los metales colados con frecuencia tienen composiciones y propiedades más uniformes que las obtenidas mediante la fundición en lingotes. [4]

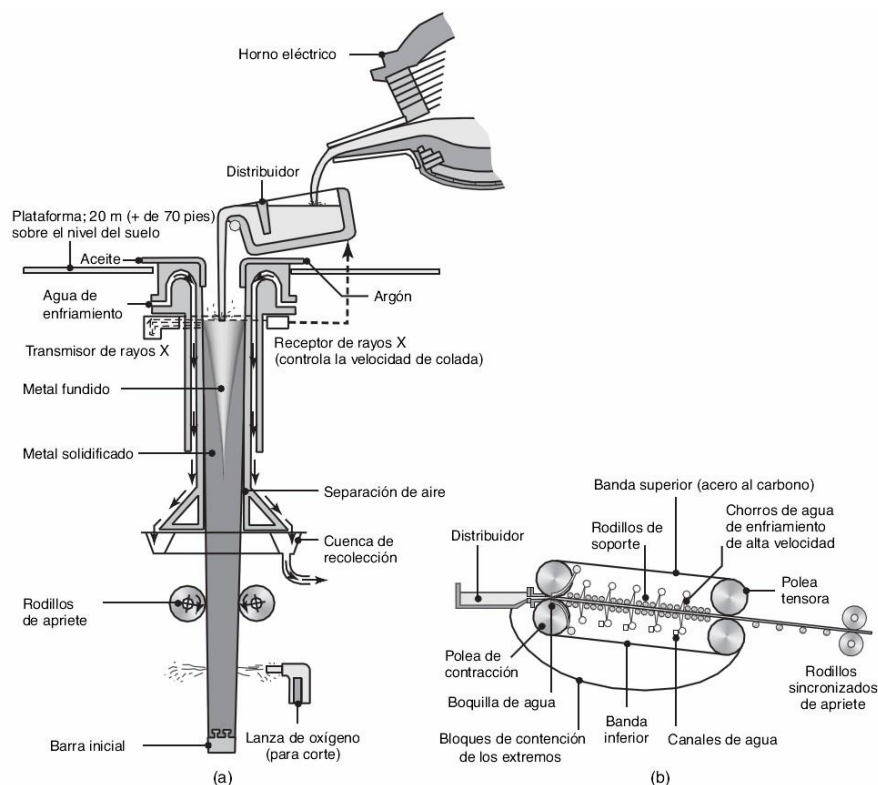


Figura 2.4. (a) Proceso de colada continua para acero. Por lo común, el metal solidificado desciende a una velocidad de 25 mm/s (1 pulgada/s). Obsérvese que la plataforma se encuentra a unos 20 m sobre el nivel del suelo. (b) Fundición continua de cinta metálica no ferrosa. [4]

Las instalaciones modernas utilizan operaciones de laminado en caliente controladas por computadora, en tiras coladas continuamente, con espesores finales de la lámina de 2 mm a 6 mm para aceros al carbono, inoxidables y eléctricos, y con capacidades para un cambio rápido de un tipo de acero a otro. Luego, las placas o formas de acero se pasan por uno o más procesos adicionales, como (a) limpieza y decapado mediante productos químicos para retirar óxidos de la superficie; (b) laminado en frío para mejorar la resistencia y el acabado superficial; (c) recocido y (d) recubrimiento (galvanizado o aluminizado) para mejorar la resistencia a la corrosión.

En la **fundición de cinta** se producen placas o tiras delgadas a partir del metal fundido. Éste se solidifica de manera similar a la de la colada continua, pero el sólido caliente se lamina después para darle la forma final (fig. 2.4.b). Los esfuerzos de compresión en el laminado sirven para reducir la porosidad y proveer mejores propiedades al material. En efecto, la fundición de cinta elimina la operación de laminado en caliente en la producción de cintas o placas de metal. [4]

En las instalaciones modernas se pueden obtener espesores finales de 2 mm a 6 mm (0.08 a 0.25 pulgadas) para aceros al carbono, inoxidables y eléctricos, así como en otros metales. [4]

2.4 Aceros al carbono y aleados

Los aceros al carbono y aleados son uno de los metales más utilizados y tienen una amplia variedad de aplicaciones (tabla 2). Las composiciones y su procesamiento se controlan de manera que sean adecuados para numerosas aplicaciones. Se encuentran disponibles en diferentes formas básicas como placa, hojalata, cinta, barra, alambre, tubo, fundiciones y forjas. [4]

Tabla 2.1. Selección típica de aceros al carbono y aleados para diversas aplicaciones. [4]

Producto	Acero	Producto	Acero
Alambre	1045, 1055	Pernos	1035, 4042, 4815
Árbol de Levas	1020, 1040	Resortes (de hojas)	1085, 4063, 9260, 6150
Bielas	1040, 3141, 4340	Resortes (helicoidales)	1095, 4063, 6150
Cadenas de Transmisión	3135, 3140	Rieles y ruedas para ferrocarril	1080
Carrocerías automóviles	1010	Rodamientos de bolas y pistas	52100
Cigüeñales(forjaos)	1045, 1145, 3135, 3140	Tren de aterrizaje	4140, 4340, 8740
Ejes	1040, 4140	Tubería	1040
Engranajes	4027, 4032	Tuercas	3130
Forjas, tuberías y accesorios aeronaves	4140, 8740		

2.4.1 Efectos de diversos elementos en los aceros

A los aceros se agregan diversos elementos para impartirles propiedades como templabilidad, resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste y capacidad para trabajarlos, soldarlos y maquinarlos. Estos elementos se mencionan en orden alfabético, con resúmenes sobre sus efectos benéficos y perjudiciales. [4]

En general, cuanto mayor porcentaje de estos elementos contengan los aceros, mayores serán sus propiedades particulares. Por ejemplo, a mayor contenido de carbono, mayor será la templabilidad del acero y tendrá más resistencia, dureza y resistencia al desgaste. En cambio, la ductilidad, soldabilidad y tenacidad se reducen con el aumento del carbono. [4]

Azufre: mejora la maquinabilidad cuando se combina con manganeso; reduce la resistencia al impacto y la ductilidad, además de dañar la calidad de la superficie y la soldabilidad. [4]

Boro: mejora la templabilidad con pérdida (o incluso con alguna mejora) en la maquinabilidad y la formabilidad. [4]

Calcio: desoxida los aceros, mejora la tenacidad y puede mejorar la formabilidad y la maquinabilidad.

Carbono: mejora la templabilidad, resistencia, dureza y resistencia al desgaste; reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad. [4]

Cerio: controla la forma de las inclusiones y mejora la tenacidad en los aceros de baja aleación de alta resistencia; desoxida los aceros. [4]

Cobalto: mejora la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas. [4]

Cobre: mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y, en menor medida, incrementa la resistencia con una pequeña pérdida de ductilidad; afecta el trabajo en caliente y la calidad de la superficie. [4]

Cromo: mejora la tenacidad, templabilidad y resistencia al desgaste, a la corrosión y a la alta temperatura; incrementa la profundidad de penetración de dureza resultante del tratamiento térmico, al promover la carburización. [4]

Fósforo: mejora la resistencia, templabilidad, resistencia a la corrosión y maquinabilidad; reduce severamente la ductilidad y la tenacidad. [4]

Magnesio: tiene los mismos efectos del cerio. [4]

Manganeso: mejora la templabilidad, resistencia, resistencia a la abrasión y maquinabilidad; desoxida el acero fundido, reduce la fragilización en caliente y disminuye la soldabilidad. [4]

Molibdeno: mejora la templabilidad, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temperatura elevada, resistencia a la termofluencia y dureza; minimiza la fragilización por revenido. [4]

Niobio (*columbio*): refina el tamaño del grano y mejora la resistencia y tenacidad al impacto; reduce la temperatura de transición y puede disminuir la templabilidad. [4]

Níquel: mejora la resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión; mejora la templabilidad. [4]

Plomo: mejora la maquinabilidad; provoca la fragilización por metal líquido. [4]

Selenio: mejora la maquinabilidad. [4]

Silicio: mejora la resistencia, dureza, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica; disminuye la pérdida por histéresis magnética, maquinabilidad y formabilidad en frío. [4]

Tantalio: tiene efectos similares a los del niobio. [4]

Telurio: mejora la maquinabilidad, formabilidad y tenacidad. [4]

Titanio: mejora la templabilidad; desoxida los aceros. [4]

Tungsteno: tiene los mismos efectos que el cobalto. [4]

Vanadio: mejora la resistencia, tenacidad, resistencia a la abrasión y dureza a temperaturas elevadas; inhibe el crecimiento del grano durante el tratamiento térmico. [4]

Zirconio: tiene los mismos efectos que el cerio. [4]

2.4.2 Elementos residuales en los aceros

Durante la producción, refinación y el procesamiento del acero, suelen quedar algunos *elementos residuales* (**trazas de elementos**). Aunque los de la lista anterior también se pueden considerar residuales, por lo general los elementos residuales indeseables son los que se indican a continuación:

Antimonio y arsénico: provocan fragilización por revenido. [4]

Estaño: provoca fragilización en caliente y por revenido. [4]

Hidrógeno: fragiliza severamente los aceros; sin embargo, el calentamiento durante el proceso expelle la mayoría del hidrógeno. [4]

Nitrógeno: mejora la resistencia, dureza y maquinabilidad; en los aceros desoxidados con aluminio, controla el tamaño de las inclusiones, mejora la resistencia y la tenacidad y disminuye la ductilidad y la tenacidad. [4]

Oxígeno: aumenta ligeramente la resistencia de los aceros efervescentes; reduce de modo severo la tenacidad. [4]

2.4.3 Denominaciones de los aceros

Tradicionalmente, el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE) han denominado los aceros al carbono y aleados utilizando cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los elementos aleantes y sus porcentajes; y los dos últimos indican el contenido de carbono en peso. Las denominaciones de la American Society for Testing and Materials (ASTM) son otro sistema de numeración que incorpora las denominaciones de AISI y SAE e incluye especificaciones estándar para los productos de acero. Para los metales ferrosos, la denominación consiste en la letra “A” seguida de números arbitrarios (en general tres). [4]

Al sistema de numeración actual se le conoce como Sistema Unificado de Numeración (UNS, por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente adoptado por las industrias de metales ferrosos y no ferrosos. Consta de una letra que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos que denominan su composición química. Las letras utilizadas para denominación son: [4]

G: para aceros AISI y SAE al carbono y aleados.

S: para aceros inoxidable y superaleaciones

J: para aceros fundidos

T: para aceros para herramientas.

K: para aceros diversos y aleaciones ferrosas

2.4.4 Aceros al carbono

Los aceros al carbono suelen clasificarse por su proporción (en peso) de contenido de carbono. En la tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas generales de los aceros al carbono y aleados. [4]

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas características de aceros al carbono y aleados seleccionados, en condiciones de laminado en caliente, normalizado y recocido.[4]

AISI	Proceso	Resistencia máx. a tracción (MPa)	Resistencia máx. a fluencia(MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
1020	Laminado	448	346	36	59	143
	Normalizado	441	330	35	67	131
	Recocido	393	294	36	66	111
1080	Laminado	1010	586	12	17	293
	Normalizado	965	524	11	20	293
	Recocido	615	375	24	45	174
3140	Normalizado	891	599	19	57	262
	Recocido	689	422	24	50	197
4340	Normalizado	1279	861	12	36	363
	Recocido	744	472	22	49	217
8620	Normalizado	632	385	26	59	183
	Recocido	536	357	31	62	149

- **Acero al bajo carbono**, también llamado **acero dulce**, tiene menos de 0.30% de C. Con frecuencia se utiliza para productos industriales comunes (como pernos, tuercas, hojas, placas y tubos) y para componentes de máquinas que no requieren alta resistencia. [4]

- **Acero al medio carbono**, tiene de 0.30% a 0.60% de C. Generalmente se utiliza en aplicaciones que requieren una mayor resistencia que la disponible en los aceros al bajo carbono, como en maquinaria, partes de equipos automotores y agrícolas (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), equipo ferroviario y partes de maquinaria para el trabajo de los metales. [4]

- **Acero al alto carbono**, tiene más de 0.60% de C. En general, el acero de alto carbono se utiliza en partes que requieren resistencia, dureza y resistencia al desgaste, como herramientas de corte, cables, alambre musical, resortes y cuchillería. Después de formársele, usualmente se da tratamiento térmico y revenido a las partes. Cuanto más carbono tenga el acero, mayores serán su dureza, resistencia y resistencia al desgaste luego del tratamiento térmico. [4]

- Los aceros al carbono que contienen azufre y fósforo se conocen como aceros al carbono **resulfurizados** (serie 11xx) y como aceros al carbono **refosforizados y resulfurizados** (serie 12xx). Por ejemplo, el acero 1112 es resulfurizado con un contenido de carbono de 0.12%. Estos aceros tienen una maquinabilidad mejorada. [4]

2.4.5 Aceros aleados

A los aceros con cantidades significativas de elementos aleados se les llama aceros aleados; por lo común se fabrican con mayor cuidado que los aceros al carbono. Los aceros aleados grado estructural se utilizan sobre todo en las industrias de la construcción y del transporte, debido a su mayor resistencia. Otros aceros aleados se usan en aplicaciones donde se requiere resistencia, dureza, resistencia a la termofluencia y a la fatiga, así como tenacidad. Estos aceros se pueden tratar térmicamente para obtener las propiedades deseadas. [4]

2.4.6 Aceros de alta resistencia y de baja aleación

Para mejorar la relación resistencia a peso de los aceros se han desarrollado **numerosos aceros de alta resistencia y de baja aleación** (HSLA, por sus siglas en inglés), que tienen un bajo contenido de carbono (en general menos de 0.30%) y se caracterizan por una microestructura consistente en una fase de ferrita de grano fino y una segunda fase de martensita y austenita. [4]

Desarrollados a principios de la década de 1930, los aceros HSLA se producen por lo común en la forma de lámina mediante microaleación y laminado en caliente controlado. A partir de estos aceros se fabrican placas, barras y formas estructurales. Sin embargo, la ductilidad, formabilidad y soldabilidad de los aceros HSLA suelen ser inferiores a las de los aceros convencionales de baja aleación. Para mejorar estas propiedades, se han desarrollado los **aceros bifásicos**. [4]

Típicamente, las láminas de aceros HSLA se utilizan en partes de carrocerías automotrices y otros equipos de transporte (para reducir el peso, y de ahí, el consumo de combustible) y en minería, agricultura y diversas aplicaciones industriales. Las placas de HSLA se emplean además en barcos, puentes, construcción de edificios y para formas como vigas I, canales y ángulos que se usan en edificios y estructuras variadas. [4]

Denominaciones. Tres categorías integran el sistema de denominaciones AISI para la lámina de acero de alta resistencia: la *calidad estructural* (S) incluye los elementos C, Mn, P y N; las *aleaciones bajas* (X) contienen Nb, Cr, Cu, Mo, Ni, Si, Ti, V y Zr, solos o combinados; los *aceros resistentes al ambiente* (W) tienen una resistencia a la corrosión ambiental casi cuatro veces mayor que la de los aceros convencionales al bajo carbono y contienen Si, P, Cu, Ni y Cr en diversas combinaciones. Además, la formabilidad de esta lámina de acero se clasifica mediante las letras F (excelente), K (buena) y O (regular). [4]

Aceros microaleados. Estos aceros HSLA desarrollados recientemente proporcionan propiedades superiores y pueden eliminar la necesidad de tratamiento térmico. Tienen una microestructura de ferrita-perlita con partículas finas dispersas de nitruro de carbono. Aunque se han producido numerosos aceros microaleados, el característico es el que contiene 0.5% de C, 0.8% de Mn y 0.1% de V. [4]

Cuando se someten a un enfriamiento cuidadosamente controlado (por lo general en aire), estos materiales desarrollan una resistencia mejorada y uniforme. Comparados con los aceros al medio carbono, los aceros microaleados también pueden aportar ahorros de costos de hasta 10%, pues no se requieren los pasos de manufactura de temple, revenido y relevo de esfuerzos. [4]

Aceros nanoaleados. Actualmente en desarrollo, estos aceros tienen tamaños de grano muy pequeños (10–100 nm) y se producen mediante vidrios metálicos como precursores. El vidrio metálico se somete a un proceso de vitrificación (cristalización) cuidadosamente controlado, a una velocidad de nucleación muy alta, lo que produce finas fases a escala nanométrica. [4]

2.4.7 Aceros bifásicos

Los **aceros bifásicos**, denominados con la letra “D”, se procesan especialmente para tener una estructura mixta de ferrita y martensita. Desarrollados a finales de la década de 1960, estos aceros tienen una característica elevada de endurecimiento por trabajo, que mejora su ductilidad y formabilidad. [4]

2.5 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se caracterizan por su resistencia a la corrosión, alta resistencia y ductilidad, así como por su elevado contenido de cromo. Se les llama *inoxidables* porque, en la presencia de oxígeno (aire), desarrollan una delgada película de óxido de cromo, dura y adherente, que protege al metal de la corrosión (*pasivación*). Esta película protectora se vuelve a acumular en caso de que se raye la superficie; para que la pasivación ocurra, el contenido mínimo de cromo debe ser de 10% a 12% en peso. [4]

Además del cromo, otros elementos de aleación típicos de los aceros inoxidables son el níquel, molibdeno, cobre, titanio, silicio, manganeso, columbio, aluminio, nitrógeno y azufre. La letra L se utiliza para identificar los aceros de bajo carbono. A mayor contenido de carbono, menor será la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, debido a que el carbono se combina con el cromo en el acero y forma carburo de cromo; la reducida disponibilidad de cromo reduce la pasividad del acero. [4]

De igual manera, el carburo de cromo introduce una segunda fase y, a partir de ahí, promueve la corrosión galvánica. (Las estatuas de los soldados en el Monumento a los Veteranos de la Guerra de Corea en Washington, D.C., están fundidas en acero inoxidable 316L). [4]

Desarrollados a principios de 1900, los aceros inoxidables se fabrican mediante hornos eléctricos o por el proceso básico de oxígeno y se procesan mediante técnicas similares a las utilizadas en otros tipos de producción de acero. [4]

El nivel de pureza se controla por medio de diversas técnicas de refinación. Los aceros inoxidables están disponibles en una amplia variedad de formas; las aplicaciones típicas incluyen cuchillería, equipos para cocina, para el cuidado de la salud y quirúrgico, y se usan en las industrias química, de procesamiento de alimento y del petróleo. Un uso reciente del acero inoxidable es como varilla de refuerzo (rebar) en concreto reforzado para algunas secciones de puentes, carreteras, edificios y otras formas de construcción, sobre todo en el ambiente marino. [4]

Las ventajas son: mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión contra cloruros como la sal, así como contra el concreto en el que se embute la varilla. Aunque el costo inicial es elevado, se estima que, debido a los menores costos de mantenimiento, el acero inoxidable es más económico que las varillas de acero al carbono a lo largo de la vida útil de la estructura. Generalmente, los aceros inoxidables se dividen en cinco tipos (ver tabla 4): [4]

Austeníticos (series 200 y 300). En general, estos aceros están compuestos de cromo, níquel y manganeso en hierro. No son magnéticos y tienen excelente resistencia a la corrosión, pero son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Los aceros inoxidables austeníticos se endurecen mediante el trabajo en frío. Son los aceros inoxidables más dúctiles y se pueden formar con facilidad, aunque su formabilidad se reduce con mayor trabajo en frío. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como los artículos de cocina, accesorios, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor, así como en componentes para ambientes químicos severos. [4]

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados. [4]

AISI	Resistencia máx. a tracción (MPa)	Resistencia máx. a fluencia(MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Reducción de área (%)
303	550-620	240-260	53-50	Productos de máquinas roscadoras (flechas, válvulas, pernos, bujes y tuercas) y accesorios para aeronaves (pernos, tuercas, remaches, tornillos, espárragos).
304	5-620	240-290	60-55	Equipo químico y de proceso de alimentos, recipientes criogénicos, canales, caños y placas de escurrimiento.
316	50-590	210-290	60-55	Alta resistencia a la corrosión y alta resistencia a la termofluencia, equipo químico y para manejo de pulpas, equipo fotográfico, cubas para brandy, partes para fertilizadoras, jarras para cocinar salsa de tomate y tinas para levadura.
410	480-520	240-310	35-25	Partes para máquinas, flechas para bombas, pernos, bujes, canales para carbón, cuchillería, polipastos, herramientas, partes para motores de aviones, maquinaria para minería, cañones para armas, tornillos y válvulas.
416	480-520	275	30-20	Accesorios para aviones, pernos, tuercas, insertos para extinción de incendios, remaches y tornillos.

Ferríticos (serie 400). Estos aceros tienen un alto contenido de cromo (hasta 27%), son magnéticos y poseen buena resistencia a la corrosión, pero su ductilidad es más baja que la de los aceros inoxidables austeníticos. Los ferríticos se endurecen mediante trabajo en frío y no se les puede dar tratamiento térmico. En general se utilizan en aplicaciones no estructurales, como equipo para cocina y guardafangos automovilísticos. [4]

Martensíticos (series 400 y 500). La mayoría de los aceros inoxidables martensíticos carecen de níquel y se endurecen mediante tratamiento térmico. Su contenido de cromo puede ser hasta de 18%, son magnéticos y tienen alta resistencia, dureza y resistencia a la fatiga, buena ductilidad y resistencia moderada a la corrosión. Se utilizan comúnmente en cuchillería, herramientas quirúrgicas, instrumentos, válvulas y resortes. [4]

De endurecimiento por precipitación (PH, por sus siglas en inglés). Estos aceros contienen cromo y níquel, junto con cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen buena resistencia a la corrosión, ductilidad y alta resistencia a temperaturas elevadas. Se aplican principalmente en aeronaves y componentes estructurales aeroespaciales. [4]

De estructura dúplex. Estos aceros tienen una mezcla de austenita y ferrita. Poseen buena resistencia y una mayor resistencia a la corrosión (en la mayoría de los ambientes) y al agrietamiento por esfuerzo-corrosión que los aceros austeníticos de la serie 300. Se aplican sobre todo en plantas de tratamiento de aguas y en componentes de intercambiadores de calor. [4]

2.6 Aceros para matrices y herramientas

Los **aceros para matrices y herramientas** (tablas 2.4 y 2.5) son aceros aleados especialmente diseñados para alta resistencia, tenacidad al impacto y resistencia al desgaste a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Se utilizan por lo común en el formado y maquinado de metales. [4]

2.6.1 Aceros de alta velocidad

Los **aceros de alta velocidad** (**HSS**, por sus siglas en inglés) son los aceros para herramientas y matrices con mayores aleaciones. Desarrollados a principios de 1900, mantienen su dureza y resistencia a elevadas temperaturas de operación. Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: el **tipo molibdeno** (serie M) y el **tipo tungsteno** (serie T). [4]

La **serie M** contiene hasta 10% de molibdeno, con cromo, vanadio, tungsteno y cobalto como otros elementos de aleación. La **serie T** contiene de 12% a 18% de tungsteno, con cromo, vanadio y cobalto como otros elementos de aleación. Los aceros de la serie M por lo general tienen una mayor resistencia a la abrasión que los de la serie T, sufren menos distorsión durante el tratamiento térmico y su costo es menor. La serie M constituye casi 95% de todos los aceros de alta velocidad producidos en Estados Unidos. Las herramientas de acero de alta velocidad se pueden recubrir con nitruro de titanio y con carburo de titanio para mejorar la resistencia al desgaste. [4]

Tabla 2.4. Tipos básicos de aceros para matrices y herramientas. [4]

Tipo	AISI
De Alta velocidad	M (base de molibdeno) T (base de tungsteno) H1 a H19 (base de cromo)
De trabajado en caliente	H20 a H39 (base de tungsteno) H40 a H59 (base de molibdeno)
De trabajado en frío	D (alto carbono, alto cromo) A (aleación media, alta templabilidad) O (templabilidad en aceite)
Resistente al impacto	S
Aceros para moldes	P1 a P19 (bajo carbono) P20 a P39 (otros)
De propósito especial	L (baja aleación) F (carbono-tungsteno)
Templables al agua	W

Tabla 2.5. Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramientas. [4]

AISI	Resist. a la descaburización	Resist. al Agrietamiento	Dureza aprox. HRC	Maquinabilidad	Tenacidad	Resist. al Ablandamiento	Resist. al desgaste
M2	Media	Media	60-65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T1	Alta	Alta	60-65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T5	Baja	Media	60-65	Media	Baja	La más alta	Muy alta
H11	Media	La más alta	38-55	Media a alta	Muy alta	Alta	Media
A2	Media	La más alta	57-62	Media	Media	Alta	Alta
A9	Media	La más alta	35-56	Media	Alta	Alta	Media a alta
D2	Media	Alta	54-61	Baja	Baja	Alta	Alta a muy alta
D3	Media	Alta	36-54	Baja	Baja	Alta	Muy alta
H21	Media	Alta	36-54	Media	Alta	Alta	Media a alta
H26	Media	Alta	43-58	Media	Media	Muy alta	Alta
P20	Alta	Alta	28-37	Media a alta	Alta	Baja	Baja a media
P21	Alta	La más alta	30-40	Media	Media	Media	Media
W1, W2	La más alta	Media	50-64	La más alta	Alta	Baja	Baja a media

2.6.2 Aceros para matrices

Los **aceros para trabajo en caliente** (serie H) están diseñados para usarse en temperaturas elevadas. Tienen una alta tenacidad, así como una gran resistencia al desgaste y al agrietamiento. En general, los elementos de aleación son tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio. Los **aceros para trabajo en frío** (series A, D y O) se utilizan en operaciones de trabajo en frío; están disponibles en los tipos templables al aceite y al aire. Los aceros **resistentes al impacto** (serie S) se diseñan para tener tenacidad al impacto y se utilizan en aplicaciones como matrices para cabeceado, punzones y cinceles. Otras propiedades de estos aceros dependen de su composición en particular. En la tabla 2.6 se presentan diversos materiales para herramientas y matrices para una variedad de aplicaciones de manufactura. [4]

Tabla 2.6. Materiales típicos para matrices y herramienta para trabajo de los metales. [4]

Proceso	Material
Fundición a presión	H13, P20
Metalurgia de polvos	
Punzones	A2, S7, D2, D3, M2
Matrices	WC, D2, M2
Moldes para plásticos y hule	S1, O1, A2, D2, 6F5, 6F6, P6, P20, P21, H13
Forjado en caliente	6F2, 6G, H11, H12
Extrusión en caliente	H11, H12, H13, H21
Cabeceado en frío	W1, W2, M1, M2, D2, WC
Extrusión en frío	
Punzones	A2, D2, M2, M4
Matrices	O1, W1, A2, D2
Acuñado	52100, W1, O1, A2, D2, D3, D4, H11, H12, H13
Estirado	
Alambre	WC, diamante
Formas	WC, D2, M2
Barras y tubos	WC, W1, D2
Laminados	
Laminado	

Laminado de cuerdas	Hierro fundido, acero fundido, acero
Laminado de corte	forjado, WC A2, D2, M2 A2, D2, D3
Hojas metálicas	
Cizallado	
En frío	D2, A2, A9, S2, S5, S7
En caliente	H11, H12, H13
Prensado	Aleaciones de zinc, acero 4140, hierro fundido, compuestos de epóxicas, A2, D2, O1
Embutido profundo	W1, O1, hierro fundido, A2, D2
Maquinado	Carburos, aceros de alta velocidad, cerámicas, diamante, nitruro de boro cúbico

3 PROCESO DE LAMINACIÓN

3.1 Introducción

La **laminación** es el proceso que consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con un conjunto de **rodillos** (fig. 3.1). Es similar al laminado de la masa para pan, en el que se emplea un rodillo para reducir su espesor. La laminación, que incluye a casi 90% de todos los metales producidos mediante procesos de conformado, se desarrolló por primera vez a finales del siglo XVI. Por lo general, las prácticas modernas tanto de aceración como de fabricación de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas combinan los procesos de colada continua con los de laminación, lo que mejora en gran medida la productividad y disminuye los costos de producción. [4]

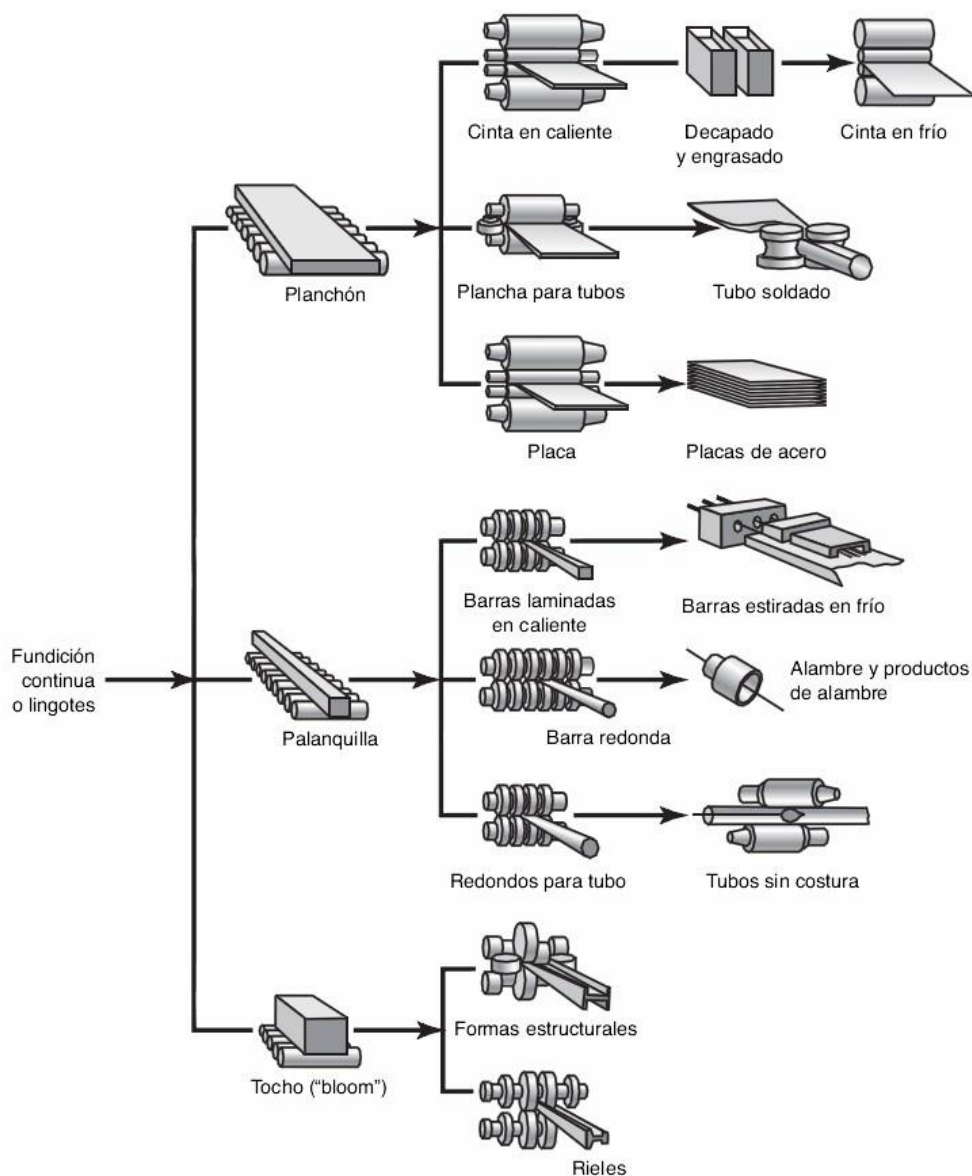


Figura 3.1. Esquema de diversos procesos de laminación plana y laminación de forma. [4]

Primero se efectúa la laminación a temperaturas elevadas (**laminación en caliente**). Durante esta fase, la estructura de grano grueso, quebradiza y porosa del lingote (o de colada continua), se rompe en una estructura maleable que tiene un tamaño de grano más fino y propiedades mejoradas, como resistencia y dureza. [4]



Figura 3.2. Secciones. [10]

Posteriormente, se acostumbra realizar la laminación a temperatura ambiente (**laminación en frío**), en la que el producto laminado adquiere **más resistencia y dureza y mejor acabado superficial**. Sin embargo, requiere mayor energía (debido al incremento de la resistencia del material a temperatura ambiente) y da como resultado un producto con propiedades **anisotrópicas** (por la orientación preferida o fibrilado mecánico). [4]

En general, las placas tienen un espesor de más de 6 mm (1/4 pulgada) y se utilizan en aplicaciones estructurales, como cascos de barcos, calderas, puentes, maquinaria y recipientes nucleares. Las placas pueden tener espesores de hasta 300 mm (12 pulgadas) para soportes estructurales grandes, 150 mm (6 pulgadas) para recipientes de reactores y de 100 a 125 mm (4 a 5 pulgadas) para buques y tanques de guerra. [4]

Por lo general, las láminas tienen un espesor de menos de 6 mm y es común que se entreguen en forma de rollos a las compañías manufactureras, con pesos de hasta 30,000 kg, o como hojalata para su posterior procesamiento en diversos productos. [4]



Figura 3.3. Rollos laminados en caliente y en frío respectivamente. [11][12]

3.2 Proceso de laminación plana

Una cinta metálica de espesor h_0 entra en el espacio de laminación y un par de rodillos giratorios la reduce a un espesor h_f , impulsados por motores eléctricos.

La velocidad de la superficie de los rodillos es V_r . La velocidad de la cinta aumenta desde su valor de entrada V_0 conforme se mueve a través del espacio de laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. [4]

La velocidad de la cinta es mayor a la salida del espacio de laminación y se denota como V_f . Puesto que la velocidad de la superficie del rodillo rígido es constante, existe un deslizamiento relativo entre el rodillo y la cinta a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación, L . En un punto a lo largo de la longitud de contacto (conocido como **punto neutral** o punto no deslizante), la velocidad de la cinta es la misma que la del rodillo. A la izquierda de este punto, el rodillo se mueve más rápido que la cinta; a la derecha, la cinta se mueve más rápido que el rodillo. Por consiguiente, las fuerzas de fricción, que se oponen al movimiento entre los dos cuerpos deslizantes, actúan sobre la cinta como se muestra en la figura 3.4b. [4]

Los rodillos jalan el material hacia el espacio de laminación por medio de una fuerza de fricción neta, por lo que ésta debe estar a la derecha en la figura 3.4b. Esto también significa que la fuerza de fricción que se ubica a la izquierda del punto neutral debe ser superior a la de la derecha. Aunque la fricción es necesaria para laminar los materiales (como sucede al conducir un automóvil en una carretera), la energía se disipa al vencer la fricción. Por lo tanto, cuando aumenta la fricción también aumentan las fuerzas de laminado y la demanda de energía. Más aún, una fricción elevada puede dañar la superficie del producto laminado (o provocar su adhesión, como ocurre al laminar masa para pan). Por ello, en la práctica se adopta una solución media (que induce coeficientes de fricción bajos mediante lubricantes eficaces). [4]

La reducción máxima posible se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la cinta ($h_0 - h_f$). Se puede demostrar que es una función del coeficiente de fricción (μ) entre la cinta y el rodillo y el radio del rodillo (R) mediante la siguiente relación:

$$h_0 - h_f = \mu^2 \cdot R$$

Como se esperaba, cuanto más alta sea la fricción y más grande el radio del rodillo, mayor será la reducción máxima posible. [4]

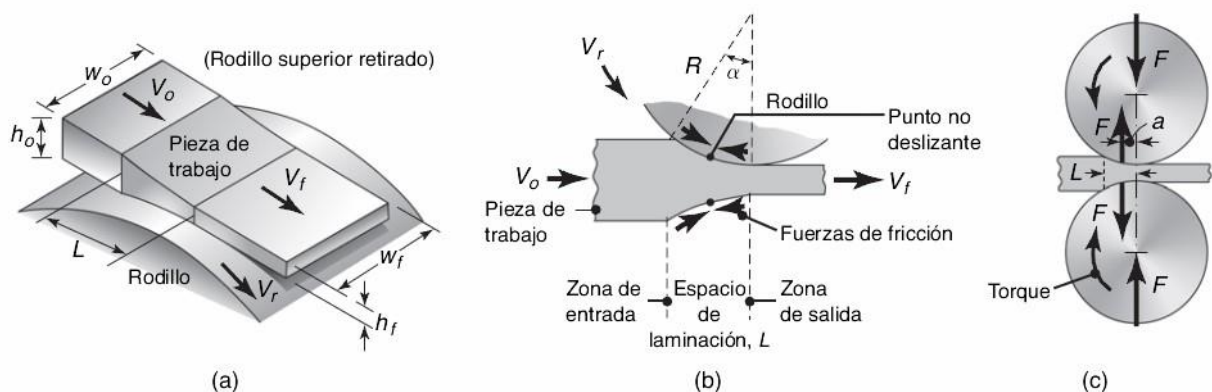


Figura 3.4. (a) Esquema del proceso de laminación plana. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. (c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. [4]

3.2.1 Reducción de la fuerza de laminado

Las fuerzas de laminado pueden provocar deflexión significativa y aplanamiento de los rodillos. A su vez, dichos cambios afectan la operación de laminado. Además, las columnas del castillo de laminación (incluyendo el bastidor, el calzo y los rodamientos, como se muestra en la fig. 3.5) se pueden flexionar debido a las altas fuerzas de laminado, de modo que el espacio de laminación puede ampliarse de manera significativa. Por lo tanto, los rodillos se tienen que instalar más cerca de lo calculado originalmente para compensar esta deflexión y obtener el espesor final deseado. [4]

Las fuerzas de laminado se pueden reducir de la siguiente manera:

- Reduciendo la fricción en la interfaz del rodillo y la pieza de trabajo.
- Utilizando rodillos de diámetro más pequeño para reducir el área de contacto.
- Aplicando reducciones menores por pase para reducir el área de contacto.
- Laminando a temperaturas elevadas para reducir la resistencia del material.
- Aplicando tensiones a la cinta.

Otro método efectivo para reducir las fuerzas de laminado consiste en aplicar **tensión longitudinal** a la cinta durante el laminado (cuya consecuencia es que los esfuerzos de compresión requeridos para deformar plásticamente el material sean más pequeños). [4]

Las tensiones son importantes porque se requieren grandes fuerzas de laminado para laminar metales de alta resistencia. Se pueden aplicar a la cinta en la zona de entrada (tensión trasera), en la zona de salida (tensión delantera), o en ambas. La tensión trasera se aplica a la lámina mediante el frenado del carrete que la alimenta dentro del espacio de laminación (carrete de alimentación) por algún medio adecuado. Se aplica tensión delantera si se aumenta la velocidad de rotación del carrete de salida. A pesar de que tiene aplicaciones limitadas y especializadas, la laminación también se puede efectuar aplicando únicamente tensión delantera, sin suministro de potencia a los rodillos; este proceso se conoce como laminado Steckel. [4]

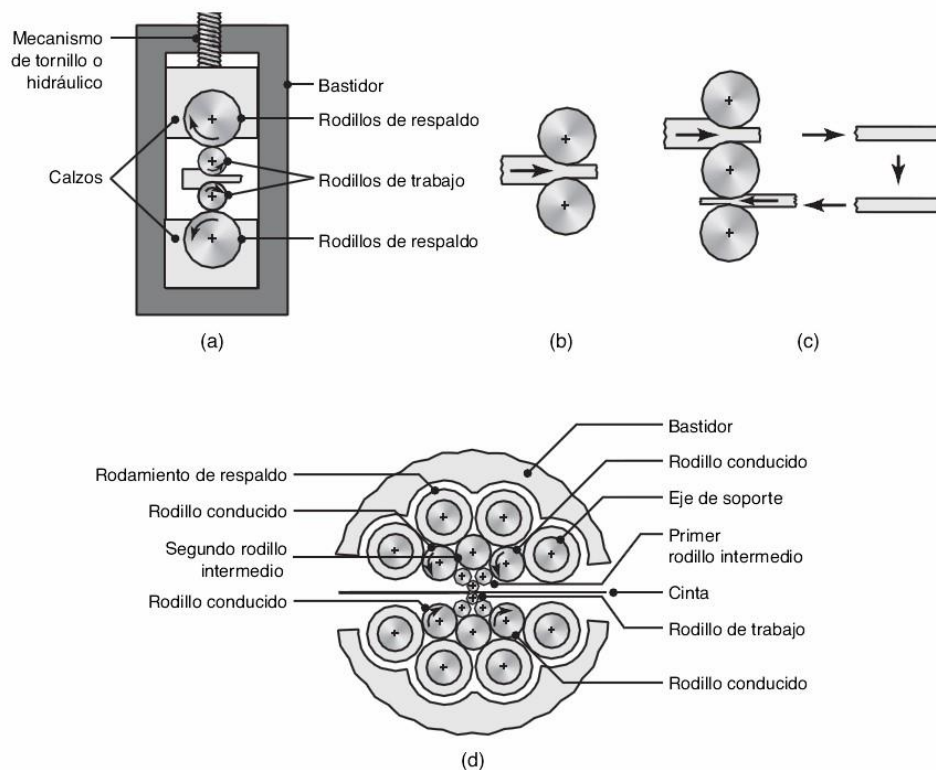


Figura 3.5. Esquema de diversos arreglos de rodillos: (a) molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características.

La rigidez del bastidor, los rodillos y los rodamientos son importantes para controlar y mantener el espesor de la cinta laminada; (b) molino de dos rodillos; (c) molino de tres rodillos, y (d) molino de laminación de conjunto (o Sendzimir).

3.3 Consideraciones geométricas

Los rodillos sufren cambios de forma durante la laminación debido a las fuerzas que actúan sobre ellos. Como sucede con una viga recta que se flexiona con carga transversal, las fuerzas de laminado tienden a doblar los rodillos elásticamente durante la laminación. Como era de esperarse, cuanto mayor sea el módulo elástico del material del rodillo, menor será su deflexión. [4]

Debido al doblado de los rodillos, la cinta laminada tiende a ser más gruesa en el centro que en los extremos (corona). El método usual para evitar este problema consiste en rectificar los rodillos de manera que el diámetro en su centro sea un poco más grande que en sus extremos (comba). Entonces, cuando el rodillo se dobla, la cinta que se está laminando tiene un espesor constante a lo largo de su anchura. En el caso de las láminas metálicas, el radio del punto máximo de la comba es por lo general 0.25 mm (0.01 pulgada) mayor que en los extremos del rodillo. Sin embargo, como era de esperarse, una comba en particular es correcta sólo para cierta carga y anchura de cinta. Si se quiere reducir los efectos de la deflexión, los rodillos también pueden someterse a doblado externo aplicando momentos en sus rodamientos (técnica que se demuestra de manera simple si se dobla una vara de madera en sus extremos, manipulación que simula la comba). [4]

Los rodillos pueden adquirir una ligera forma de barril (comba térmica) debido al calor que genera la deformación plástica durante la laminación. A menos que se compense por algún medio, esta condición puede producir cintas más delgadas en el centro que en los extremos. Por consiguiente, la comba total (o final) puede controlarse ajustando la ubicación y la velocidad de flujo del líquido refrigerante a lo largo de los rodillos durante la laminación en caliente. [4]

Las fuerzas de laminado también tienden a aplanar elásticamente los rodillos, produciendo un efecto muy similar al aplanamiento que sufren los neumáticos de los automóviles bajo alguna carga. El aplanamiento de los rodillos es poco deseable, ya que produce, en efecto, un mayor radio de laminado. A su vez, esto significa un área de contacto más grande para la misma distancia entre rodillos, y la fuerza de laminado aumenta debido a la entonces mayor área de contacto. [4]

3.3.1 Ensanchado

En la laminación de placas y láminas con altas relaciones de anchura a espesor, la anchura de la cinta permanece efectivamente constante durante la laminación. Sin embargo, con relaciones más pequeñas (como una cinta con una sección transversal cuadrada), la anchura aumenta de manera significativa conforme pasa a través de los rodillos (efecto que se observa comúnmente al laminar masa para pan con un rodillo). A este incremento en la anchura se le conoce como ensanchado. Al calcular la fuerza de laminación, la anchura w se toma como una anchura promedio. [4]

Se puede demostrar que el ensanchado aumenta con (a) la disminución de la relación anchura a espesor de la cinta de entrada (debido a la reducción en la restricción de la anchura), (b) el aumento de la fricción, y (c) la disminución de la relación del radio del rodillo al espesor de la cinta. Los últimos dos efectos se deben al aumento de restricción longitudinal del flujo de material en el espacio de laminación. También puede evitarse el ensanchado mediante rodillos adicionales (con ejes verticales) en contacto con los extremos del producto laminado en el espacio de laminación (molinos de rebordeado), aportando así una restricción física al ensanchado. [4]

3.3.2 Vibración y traqueteo

La vibración y el traqueteo pueden tener efectos significativos en la calidad de los productos y la productividad de las operaciones de trabajo de los metales. El traqueteo, que por lo general se define como vibración autoexcitada, puede presentarse en la laminación y en las operaciones de extrusión, estirado, maquinado y rectificado. En la laminación causa variaciones periódicas en el espesor de la hoja laminada y en su acabado superficial y, por lo tanto, puede provocar desperdicios excesivos. En la laminación, se ha encontrado que el traqueteo ocurre predominantemente en los molinos compuestos; es muy perjudicial para la productividad, y se ha estimado que si no fuera por él los molinos modernos de laminación podrían operar a velocidades hasta 50% más elevadas. [4]

El traqueteo es un fenómeno muy complejo y se produce debido a interacciones de la dinámica estructural del soporte del molino y la dinámica de la operación del rodillo. La velocidad de laminación y la lubricación son

sus dos parámetros más importantes. Aunque la implantación respectiva no siempre es práctica, también se ha sugerido que el traqueteo puede reducirse si aumenta la distancia entre los soportes del molino de laminación, se incrementa la anchura de la cinta, disminuye la reducción por pase (espacio de laminación), aumentan tanto el radio del rodillo como la fricción entre la cinta y el rodillo, y se incorporan amortiguadores en los soportes de los rodillos. [4]

3.4 Laminación en caliente

Por lo general, la laminación en caliente realiza los pasos iniciales de laminado (rompimiento de estructura de colada) del material por encima de la temperatura de recrystalización del metal. Una estructura fundida suele ser dendrítica e incluye granos gruesos y no uniformes; por lo común, esta estructura es quebradiza y puede ser porosa. La laminación en caliente convierte la estructura fundida en una estructura maleable con granos más finos y ductilidad mejorada, que son producto de la ruptura de límites frágiles de granos y el cierre de los defectos internos (en especial la porosidad). Los intervalos característicos de temperatura para la laminación en caliente son de casi 450 °C (850 °F) para aleaciones de aluminio, hasta 1250 °C (2300 °F) para aceros aleados y hasta 1650 °C (3000 °F) para aleaciones refractarias. [4]

Al producto de la primera operación de laminación en caliente se le conoce como tocho (bloom) o planchón (slab) (ver fig. 3.1). Por lo común, un tocho tiene una sección transversal cuadrada de al menos 150 mm (6 pulgadas) de lado; el planchón generalmente es de sección transversal rectangular. Los tochos se procesan luego mediante el laminado de forma, en donde adquieren perfiles estructurales, como vigas I y rieles para vías férreas. Los planchones se laminan como placas y láminas. Por lo regular, las palanquillas son cuadradas (con un área de sección transversal más pequeña que la de los planchones) y después se laminan adquiriendo diversas formas, como barras redondas y de diferentes secciones, mediante rodillos con perfiles. Las barras redondas laminadas en caliente (alambrón) se utilizan como materia prima para operaciones de estirado de varillas y alambres. [4]

Por lo general, en la laminación en caliente de tochos, palanquillas y planchones, la superficie del material se acondiciona (se prepara para una operación posterior) antes de laminarlo mediante el uso de un soplete, a fin de eliminar la cascarilla (descascarado) o el esmerilado grueso para alisar las superficies. Antes de la laminación en frío, se puede eliminar la cascarilla desarrollada durante la laminación en caliente por inmersión en baños con ácidos (ataque con ácidos), por medios mecánicos como el chorro de agua o también por esmerilado para eliminar otros defectos. [4]

La laminación en frío se realiza a temperatura ambiente y, en comparación con la laminación en caliente, produce láminas y cintas con mucho mejor acabado superficial (por la ausencia de cascarilla), tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas (debido al endurecimiento por deformación).

El laminado en conjunto es una operación de laminado plano en la que se laminan dos o más capas de metal al mismo tiempo, mejorando así la productividad. Por ejemplo, el papel aluminio se lamina en conjunto en dos capas, de manera que sólo las capas exteriores superior e inferior tocan los rodillos. Obsérvese que un lado de la hoja de aluminio es mate, mientras que el otro es brillante. El lado que se encuentra entre las hojas tiene un acabado mate y satinado, pero el lado entre la hoja y el rodillo es brillante y lustroso, porque ha estado bajo esfuerzos elevados de contacto con los rodillos pulidos durante el laminado. [4]

El acero dulce laminado se estira durante las operaciones de formado de lámina y sufre una elongación al punto de fluencia, fenómeno que provoca irregularidades en la superficie conocidas como deformaciones de estiramiento o bandas de Lüders. Para corregir esta situación, la lámina metálica se somete a un leve pase final de 0.5 a 1.5% de reducción, conocida como laminación de relevado o paso de superficie.

Quizá una hoja laminada no esté lo suficientemente plana al abandonar el espacio de laminación, debido a variaciones en el material de entrada o en los parámetros de procesamiento durante el laminado. Para mejorar la planicidad, por lo general la cinta laminada pasa por una serie de rodillos niveladores. Se utilizan varios arreglos de rodillos, como se muestra en la figura 3.7. La pieza de trabajo se flexiona en direcciones opuestas conforme pasa a través de una serie de rodillos, cada uno de los cuales suele accionarse por separado mediante un motor eléctrico individual. [4]

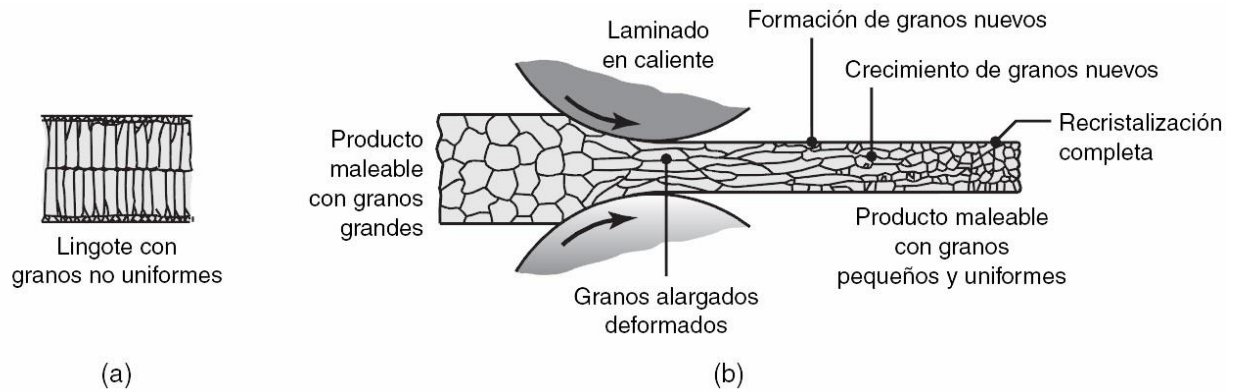


Figura 3.6. Cambios en la estructura de los granos de metales fundidos o maleables de granos grandes durante el laminado en caliente. Este proceso es una manera efectiva de reducir el tamaño de los granos en los metales para mejorar la resistencia y la ductilidad. Las estructuras fundidas de los lingotes o las fundiciones continuas se transforman en una estructura maleable por medio del trabajo en caliente. [4]

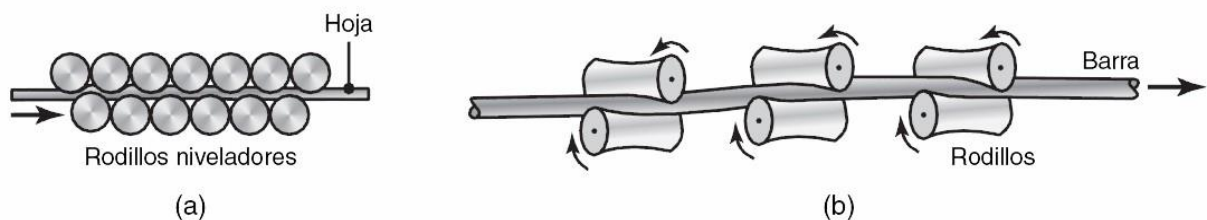


Figura 3.7. (a) Método de nivelación de rodillos para aplanar hojas laminadas. (b) Nivelación de rodillos para enderezar barras estiradas. [4]

3.5 Defectos en placas y hojas laminadas

Es posible que haya defectos en las superficies de las placas y hojas laminadas o defectos estructurales internos. Los defectos son indeseables no sólo porque degradan la apariencia de la superficie, sino también porque pueden dañar la resistencia, formabilidad y otras características de fabricación. Se han identificado diversos defectos de superficie (como cascarilla, oxidación, raspaduras, estrías, picaduras y grietas) en las láminas metálicas. Pueden tener como origen las inclusiones e impurezas en el material fundido original, o muchas otras condiciones relacionadas con la preparación del material y la operación de laminado. [4]

Los bordes ondulados en las láminas (fig. 3.8a) son el resultado de la flexión del rodillo. La cinta es más delgada a lo largo de su borde que en su centro, por lo que los bordes se estiran más que el centro. En consecuencia, los bordes se ensanchan debido a que la región central les restringe su libre expansión en la dirección longitudinal (de laminado). Por lo general, las grietas mostradas en las figuras 3.8b y c obedecen a la deficiente ductilidad de un material a la temperatura de laminación. Puesto que la calidad de los bordes de la hoja puede afectar las operaciones de formado de las láminas metálicas, con frecuencia se eliminan los efectos de los extremos en las hojas laminadas mediante operaciones de cizallado y recortado. El acocodrilado (fig. 3.8d) es un fenómeno complejo y por lo general se debe a la deformación volumétrica no uniforme de la palanquilla durante el laminado, o a la presencia de defectos en el material original fundido. [4]

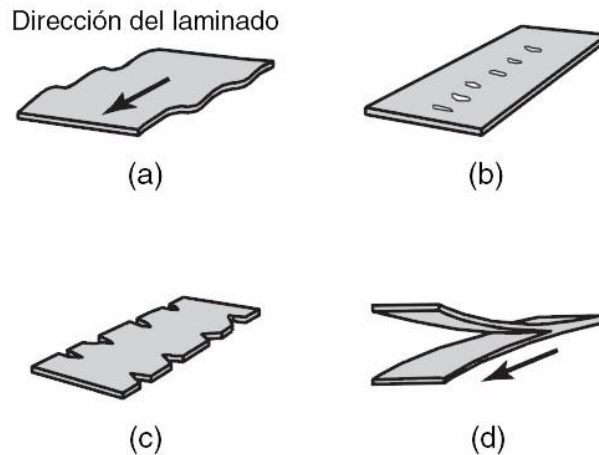


Figura 3.8. Esquema de defectos típicos en laminación plana: (a) bordes ondulados; (b) grietas en forma de cremallera en el centro de la cinta; (c) grietas de los bordes y (d) acocodrilado. [4]

3.6 Otras características de los metales laminados

3.6.1 Esfuerzos residuales

La deformación no uniforme del material en el espacio de laminación puede ocasionar que se desarrollen esfuerzos residuales en placas y hojas laminadas, en especial durante el laminado en frío. Los rodillos de diámetro pequeño o las reducciones por pase de pequeño espesor tienden a deformar plásticamente el metal más en la superficie que en el centro (fig. 3.9a). Esta situación provoca esfuerzos residuales de compresión en las superficies y esfuerzos de tensión en el centro. Por el contrario, los rodillos de diámetro grande, o las altas reducciones por pase, tienden a deformar el centro más que la superficie (fig. 3.9b). Esto se debe a una restricción más elevada de la fricción en las superficies a lo largo del arco de contacto, lo que produce distribuciones de esfuerzos residuales que se oponen a las de los rodillos de diámetro pequeño. [4]

3.6.2 Tolerancias dimensionales.

Por lo general, las tolerancias de espesor para las hojas laminadas en frío van de ± 0.1 a 0.35 mm, lo que depende del espesor. Las tolerancias son mucho más grandes para las placas laminadas en caliente debido a los efectos térmicos. Es común que las tolerancias de planicidad se encuentren dentro de ± 15 mm/m para laminado en frío y ± 55 mm/m para laminado en caliente. [4]

3.6.3 Rugosidad de la superficie

El laminado en frío puede producir un acabado superficial muy fino, por lo que es posible que los productos fabricados con hojas laminadas en frío no requieran operaciones adicionales de acabado, dependiendo de la aplicación. Nótese también que el laminado en caliente y la fundición en arena producen los mismos niveles de rugosidad superficial. [4]

3.6.4 Números de calibre

Por lo general, el espesor de una hoja se identifica por medio de un número de calibre: cuanto más pequeño es el número, más gruesa es la hoja. En la industria se utilizan diversos sistemas de numeración, lo que depende del tipo de hoja metálica que se esté clasificando. Las hojas laminadas de cobre y de latón también se identifican por los cambios de espesor durante el laminado, por ejemplo, 1/4 de dureza, 1/2 dureza y así sucesivamente. [4]

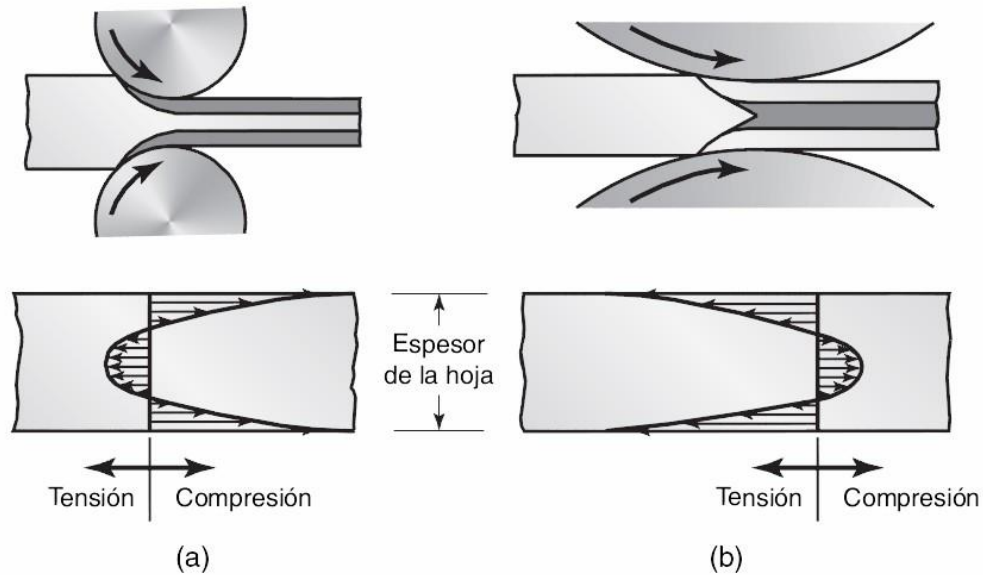


Figura 3.9. (a) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro pequeño, o en reducciones pequeñas de espesor por pase. (b) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro grande, o a altas reducciones por pase. Observe la inversión de los patrones de los esfuerzos residuales. [4]

4 TRABAJO EN EL LABORATORIO

Se ha procedido a la laminación en frío del acero con las condiciones siguientes: Se han extraído listones de una placa de acero comercial, cuya composición química se ha obtenido mediante un espectrómetro de chispa.

Tabla 4.1. Composición química del acero estudiado.

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	V %
0.116	0.89	<0.002	0.019	0.019	0.011	<0.002	<0.002	0.005	0.004

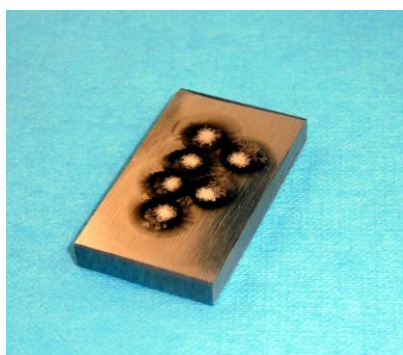


Figura 4.1. Pieza de acero tras ensayo de determinación de composición química.

Se han normalizado todos los listones mediante rectificado con muela abrasiva de alúmina, hasta obtener unas dimensiones iguales en todos ellos de (5.5x10x120 mm).

Se han laminado en una laminadora de 2 rodillos de pequeña capacidad, pero buena precisión dimensional y de acabado, para el estudio que nos ocupa.

Se ha producido reducciones paulatinas de espesor para el correspondiente estudio de la evolución de las propiedades siguientes:

Dimensiones finales	Alargamiento
Dureza	Microestructura
Resistencia a Tracción	Límite elástico

Un total de 40 probetas se han preparado y ensayado, 36 de acero al carbono, 1 de cobre, 1 de aluminio, 1 de titanio y una de acero inoxidable.

4.1 Preparación de probetas

4.1.1 Dimensionado y corte

Se han realizado mediciones en la placa de acero comercial destinado al estudio para la extracción de las 36 probetas y se han cortado con una sierra de cinta.



Figura 4.2. Marcado y corte.



Figura 4.3. Probetas antes de rectificar y rectificadora en funcionamiento.

A continuación se han rectificado para normalizar las dimensiones de todas las láminas y darles un acabado más adecuado a la superficie, tal como se puede apreciar en la figura 4.4.

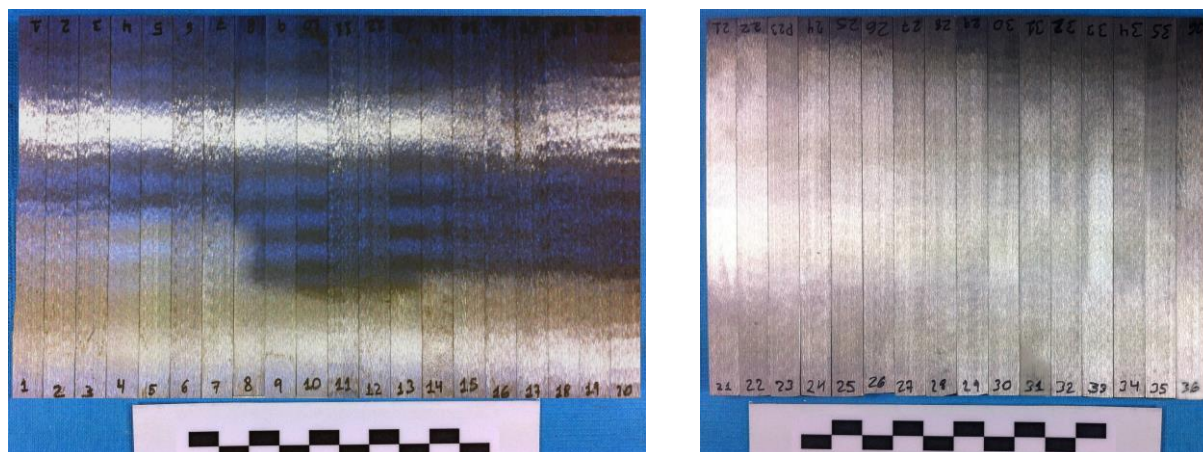


Figura 4.4. Probetas tras rectificado.

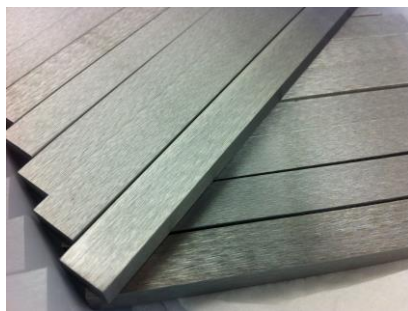


Figura 4.5. Vista de probetas rectificadas.

Tras rectificar las probetas, se han tomado medidas de todas las dimensiones: Longitud, espesor y ancho.

Tabla 4.2. Dimensiones de las probetas, en milímetros.

Probeta	Espesor (h₀)	Ancho (w₀)	Longitud (L₀)
1	5,5	10,0	121,1
2	5,5	10,1	120,5
3	5,5	10,0	120,9
4	5,5	10,0	121,0
5	5,5	10,0	120,7
6	5,5	10,0	120,1
7	5,5	10,0	120,8
8	5,5	10,0	120,5
9	5,5	10,1	121,0
10	5,5	10,1	120,3
11	5,5	10,1	120,8
12	5,5	10,1	120,8
13	5,5	10,0	120,9
14	5,5	10,1	121,4
15	5,5	10,1	120,6
16	5,5	10,1	121,8
17	5,5	10,0	121,1
18	5,5	10,1	120,9
19	5,5	10,1	121,4
20	5,5	10,0	121,0
21	5,6	10,0	122,3
22	5,6	10,0	122,2
23	5,6	10,1	122,4
24	5,6	10,0	122,2
25	5,6	10,0	122,2
26	5,5	10,0	121,3
27	5,6	10,0	122,3
28	5,6	10,0	122,2
29	5,6	10,0	122,0
30	5,5	10,0	122,2
31	5,6	10,1	122,3
32	5,6	10,0	122,2
33	5,6	10,0	122,2
34	5,6	10,0	122,3
35	5,6	10,0	122,2
36	5,5	10,0	122,2
PROMEDIO	5,5	10,0	121,4

4.2 Proceso de Deformación

4.2.1 Equipo de Laminación

El equipo de laminación empleado es una laminadora compacta de pequeña capacidad y 2 rodillos. El control de los rodillos se realiza por medio de una manivela que engrana dos discos dentados que suben o bajan el rodillo para realizar la reducción deseada.



Figura 4.6. Laminadora de pequeña capacidad.



Figura 4.7. Vistas de laminadora.

4.2.2 Laminación de las probetas de Acero

Las probetas se dividieron en parejas, para proporcionar un muestreo más eficiente de los ensayos a realizar, correspondiendo los números de referencia a las deformaciones objetivo como sigue:

Tabla 4.3. Reducción de espesor deseada.

Probeta	Reducción (%)
1-2	1
3-4	2
5-6	3
7-8	4
9-10	5
11-12	10
13-14	15
15-16	20
17-18	25
19-20	30
21-22	35
23-24	40
25-26	45
27-28	50
29-30	55
31-32	60
33-34	65
35-36	70

Tras la operación de laminado y con toda la eficiencia y rendimiento que permitía el actuador de la laminadora en cuanto a bajada del rodillo, los resultados de reducción de espesor obtenidos (media de parejas) de las probetas se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Reducción obtenida.

Probeta	Reducción deseada (%)	Reducción obtenida (%)
1-2	1	1,1
3-4	2	2,4
5-6	3	2,9
7-8	4	3,8
9-10	5	4,5
11-12	10	9,8
13-14	15	15,1
15-16	20	18,9
17-18	25	24,3
19-20	30	29,8
21-22	35	35,3
23-24	40	41,0
25-26	45	44,6
27-28	50	50,3
29-30	55	54,6
31-32	60	59,9
33-34	65	65,0
35-36	70	69,6

Los resultados obtenidos recogidos en la tabla anterior y representados en la gráfica, son aceptables dado que el nivel de precisión de la laminadora utilizada es limitado.

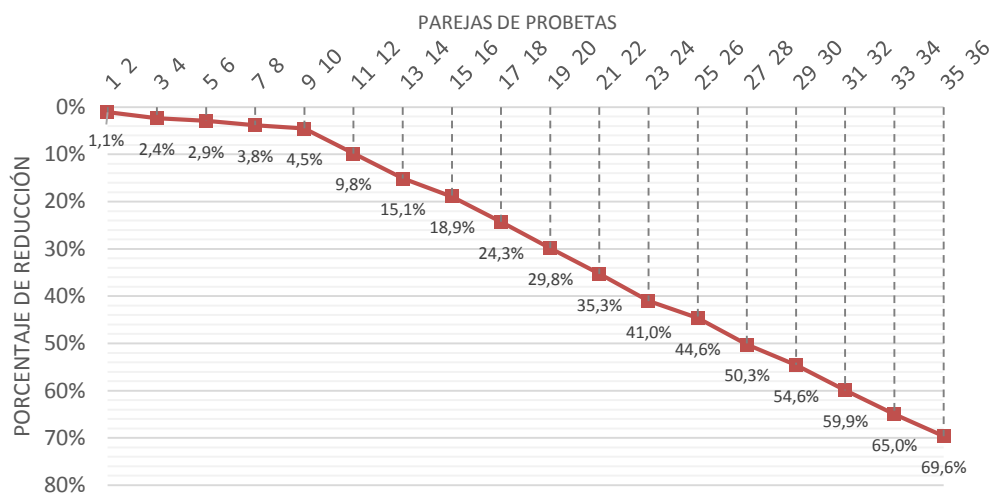


Figura 4.8. Gráfica de reducción de espesor.

4.2.2.1 Dimensionado tras laminación

Tras la operación de laminado en frío, se ha procedido al dimensionado de las probetas, para corroborar las reducciones objetivo y se ha estudiado la evolución de las dimensiones, efecto claramente visible en las gráficas posteriores.

Tabla 4.5. Dimensiones de las probetas antes y tras laminación, en milímetros.

Probeta	Espesor inicial (h_0)(mm)	Ancho inicial (w_0) (mm)	Longitud inicial (L_0) (mm)	Espesor final (h_1)(mm)	Ancho final (w_1) (mm)	Longitud final (L_1) (mm)
1-2	5,5	10,1	120,8	5,5	10,1	121,4
3-4	5,5	10,0	121,0	5,4	10,1	123,1
5-6	5,5	10,0	120,4	5,3	10,1	123,8
7-8	5,5	10,0	120,7	5,3	10,1	124,5
9-10	5,5	10,1	120,7	5,2	10,2	126,0
11-12	5,5	10,1	120,8	5,0	10,3	131,9
13-14	5,5	10,0	121,2	4,7	10,3	140,3
15-16	5,5	10,1	121,2	4,5	10,6	145,3
17-18	5,5	10,0	121,0	4,2	10,7	153,4
19-20	5,5	10,0	121,2	3,9	10,8	164,3
21-22	5,6	10,0	122,3	3,6	10,9	177,9
23-24	5,6	10,0	122,3	3,3	11,1	193,8
25-26	5,6	10,0	121,7	3,1	11,5	200,2
27-28	5,6	10,0	122,2	2,8	11,8	221,2
29-30	5,5	10,0	122,1	2,5	11,8	237,7
31-32	5,6	10,0	122,3	2,2	12,0	260,0
33-34	5,6	10,0	122,2	1,9	12,1	292,8
35-36	5,5	10,0	122,2	1,7	12,3	335,9

Una vez vistas las dimensiones finales tras las reducciones perseguidas, se observa que la dimensión transversal aumenta, pero no de forma tan significativa como las longitudes de las piezas. En el apartado de estudio metalográfico se podrán visualizar fotografías de la sección a escala macro, en la que se apreciará el cambio de la sección en las sucesivas etapas de laminación.

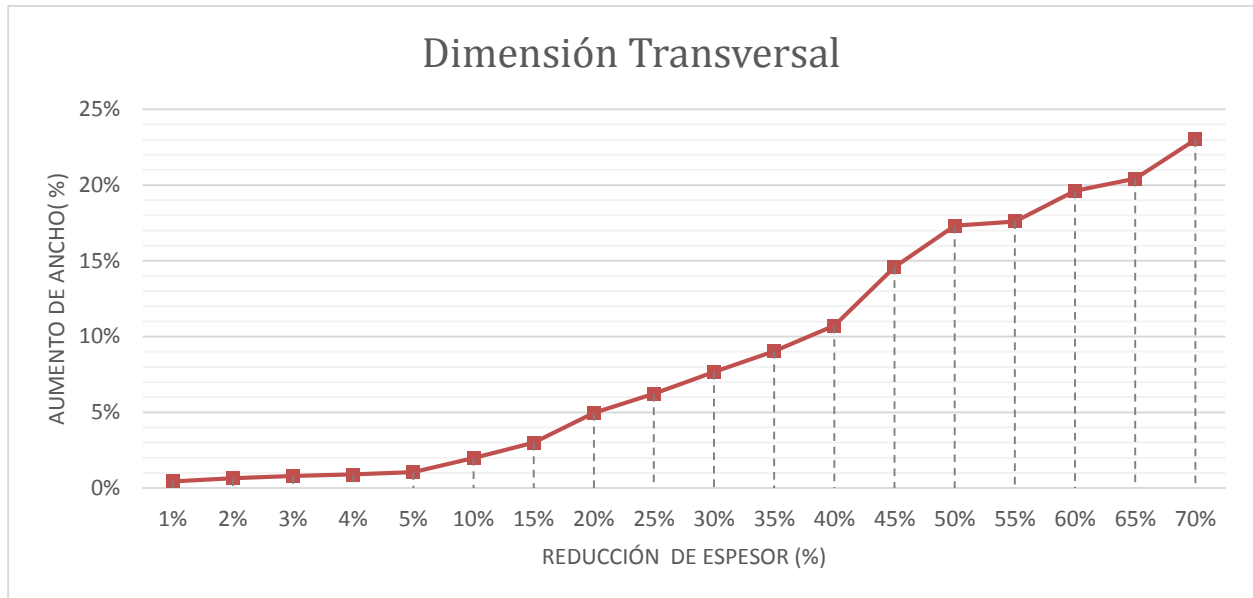


Figura 4.9. Gráfica de cambio de dimensión transversal.

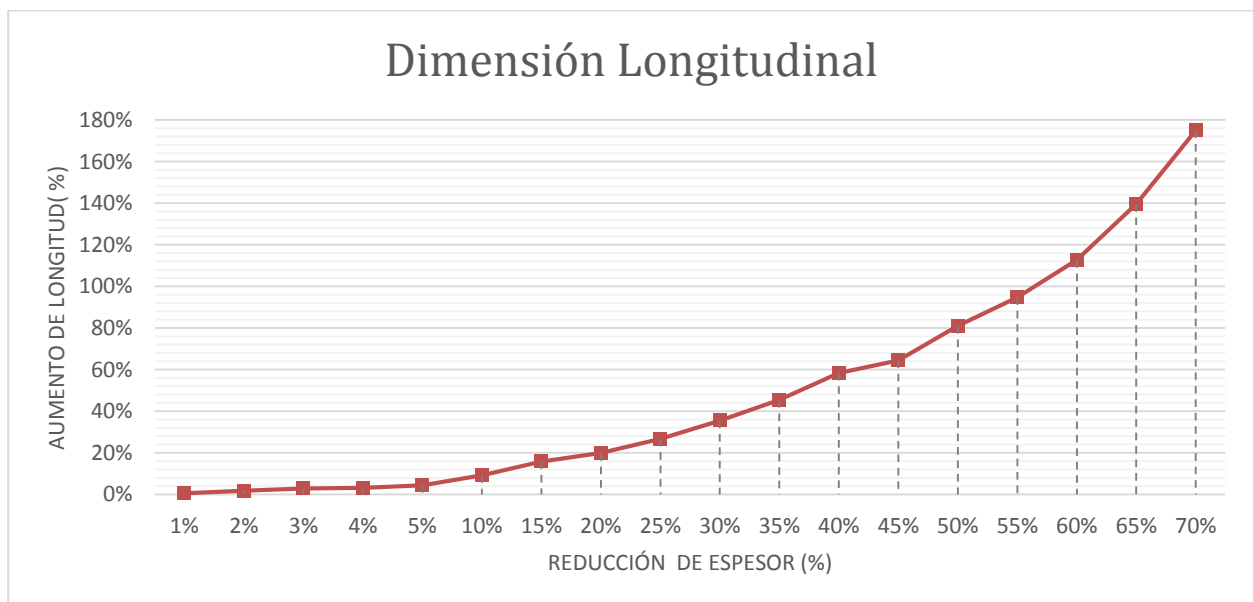


Figura 4.10. Gráfica de cambio de dimensión longitudinal.

Los órdenes de crecimiento en la dirección de laminación y en su ortogonal, difieren bastante. Este aumento longitudinal, provocará anisotropía en el material, resultado del alargamiento de la microestructura en dicha dirección longitudinal.

4.2.3 Laminación de probetas para comparación

Se ha procedido a la laminación de 4 probetas complementarias de distintos metales hasta el 50% de su espesor para comparar la micrografía, microconstituyentes y mecanismos de deformación que se han producido, así como su dureza.

Los metales laminados pueden verse en el apartado de macrografías, micrografías y sus durezas en el apartado de estudio de propiedades mecánicas.

4.3 Estudio Metalográfico

4.3.1 Extracción de Probetas

Tras la laminación de los listones, se procedió a su dimensionado y a continuación se procederá a su estudio metalográfico.

Se han seleccionado, de cada pareja de probetas con el mismo nivel de laminación, la más idónea para el ensayo de tracción (la que presenta menos curvatura axial) y la otra se ha destinado al estudio de la micrografía de las 3 dimensiones características.

Se ha cortado con una cortadora radial 3 muestras de cada listón y se ha procedido a su preparación metalográfica.

4.3.2 Empastillado, lijado, pulido y atacado.

Se ha procedido a la preparación metalográfica de forma normalizada, se han empastillado las probetas para cada estado de deformación con baquelita.

Se han ido aplicando lijas de forma gradual de granos que van desde basto (60) a fino (4000).

Tras el lijado se ha procedido al pulido químico-mecánico de las muestras con alúmina, excepto el titanio que emplea una solución apropiada para el mismo de sílica coloidal (OP-S) y peróxido de hidrógeno al 30%.

4.3.3 Análisis micrográfico

Una vez se han preparado todas las probetas, se realiza un estudio micrográfico con un microscopio óptico para ver la evolución de las microestructuras y microconstituyentes, identificando las fases y los procesos de deformación que se han producido.

- 57 piezas de acero al carbono (19 estados de laminación y 3 probetas por estado: Cara longitudinal, cara transversal y cara lateral transversal).
- 24 piezas de metales para comparación (misma distribución de caras y estados indeformado y deformado de cada uno de los 4 metales).
- Ataques químicos:
 - Acero: NITAL. (Etanol y ácido nítrico)
 - Acero inoxidable: Ácido oxálico y electrólisis.
 - Cobre: Etanol, ácido clorhídrico y cloruro férrico.
 - Aluminio: Keller (Agua destilada, ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico).
 - Titanio: Kroll (Agua destilada, ácido nítrico, ácido fluorhídrico).

En primer lugar se observarán las caras de la pieza sin deformar (0%) y posteriormente las piezas al 1%, 5%, 25%, 45% y 65%, por considerarse representativas.

3.3.3.1 Micrografías de Acero al carbono

Probeta sin deformar

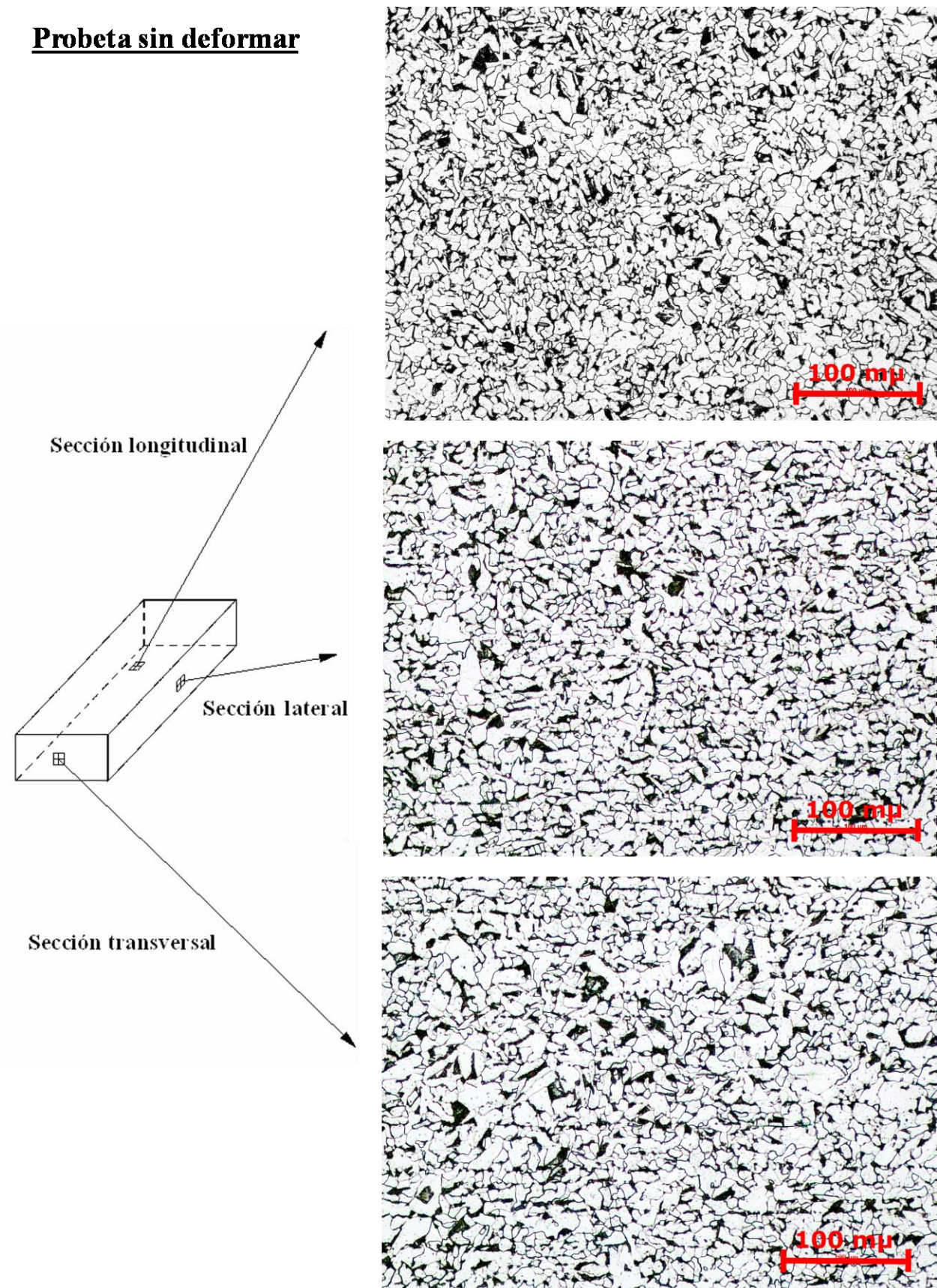


Figura 4.11. Micrografías de probeta sin deformar.

La evolución de la microestructura de la cara superior en contacto con los rodillos (longitudinal):

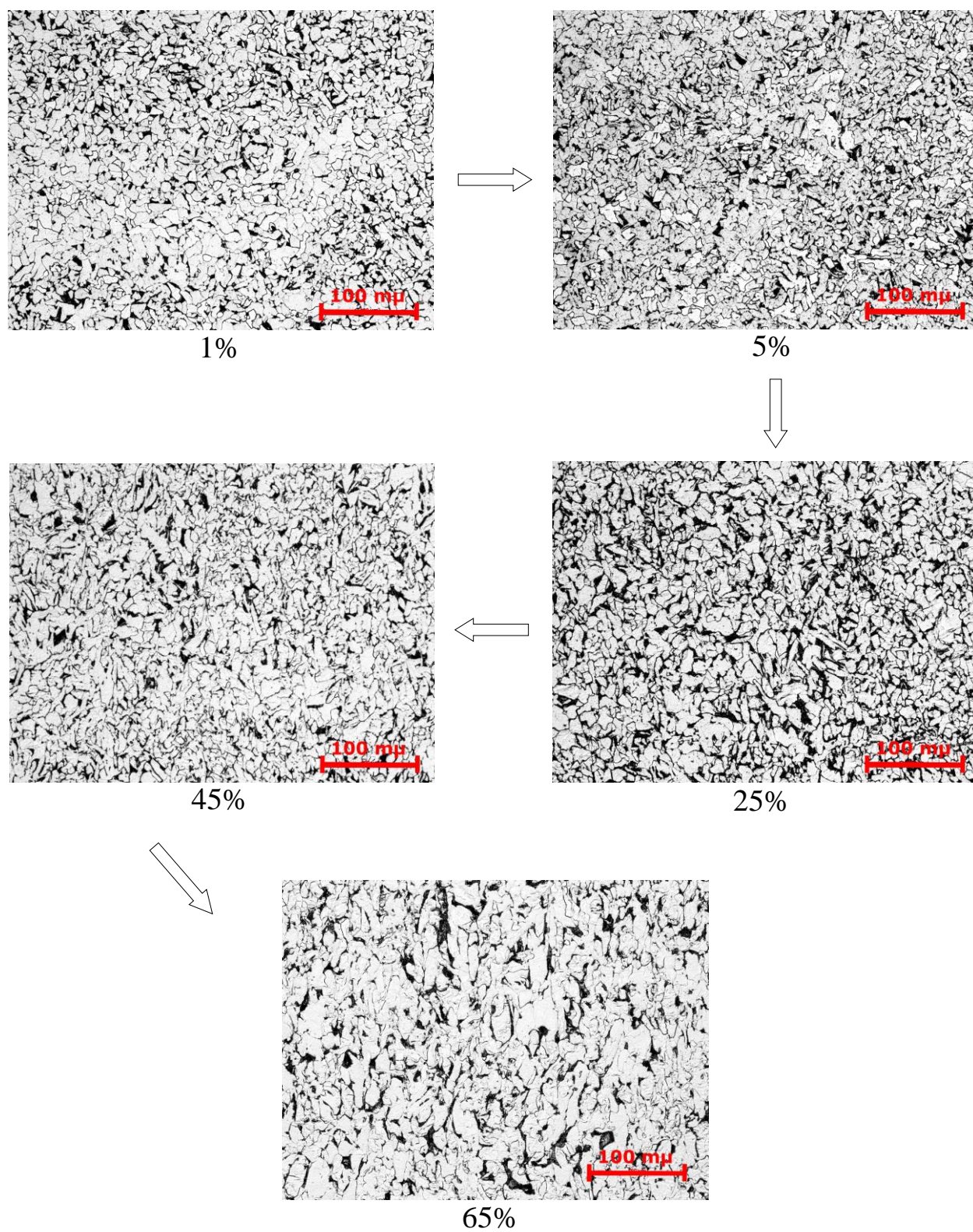


Figura 4.12. Micrografías de diferentes probetas para cada porcentaje de laminación, cara longitudinal.

A continuación se observa la evolución de la misma desde la cara lateral-transversal:

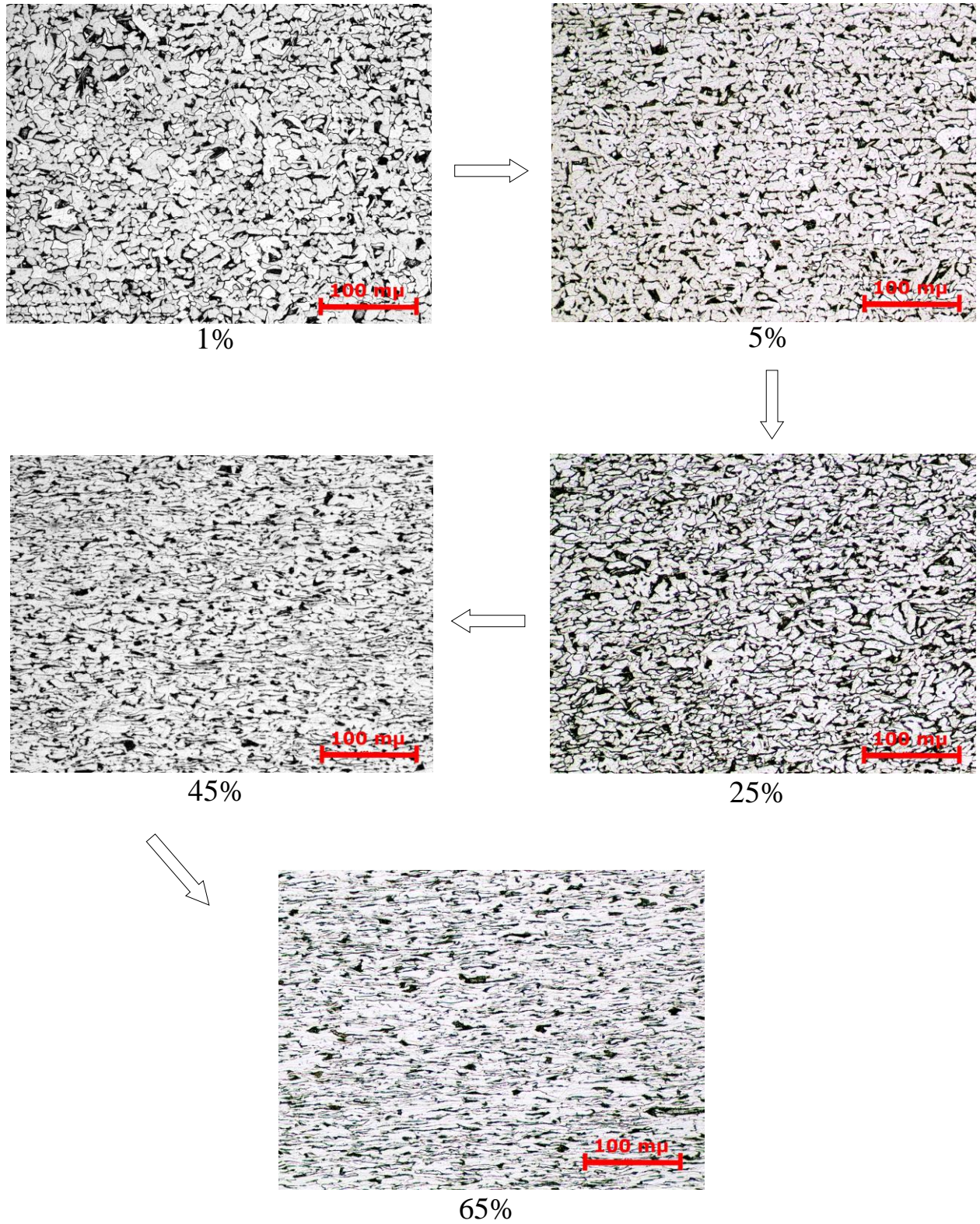


Figura 4.13. Micrografías de diferentes probetas para cada porcentaje de laminación, cara lateral-transversal.

Por último la evolución de la sección transversal:

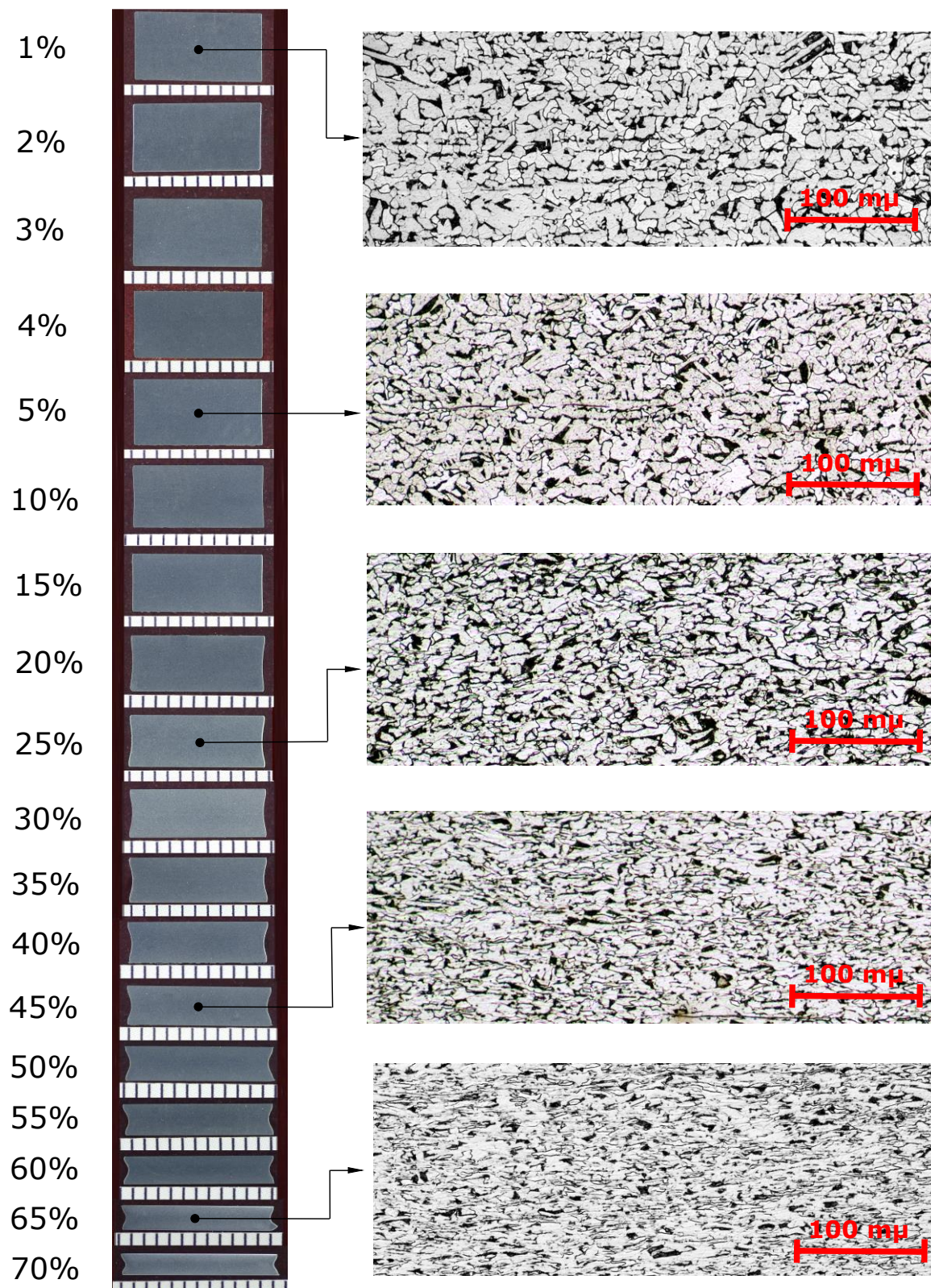
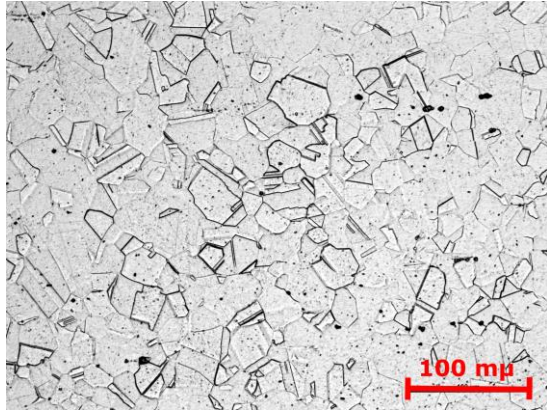


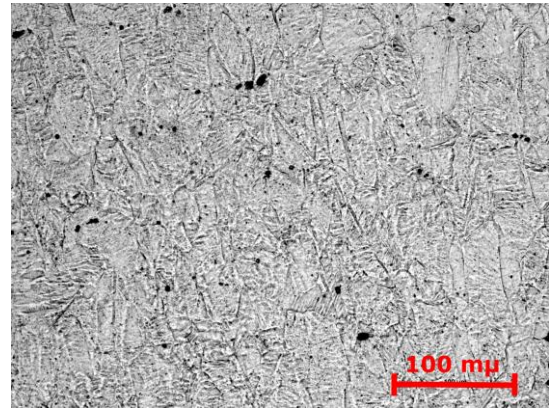
Figura 4.14. Micrografías de diferentes probetas para cada porcentaje de laminación, sección transversal, junto con macrografías de la sección transversal de todos los estados de laminación.

3.3.3.2 Micrografías del Acero inoxidable austenítico

Cara Longitudinal

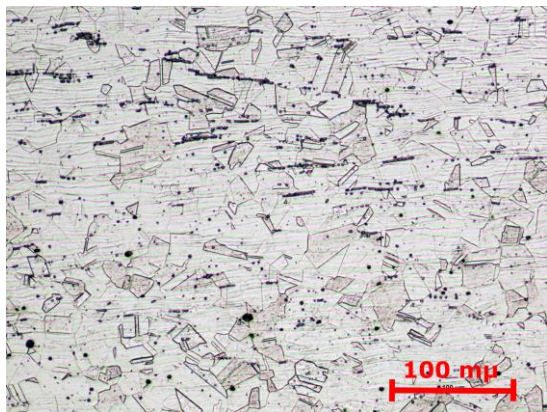


0 %

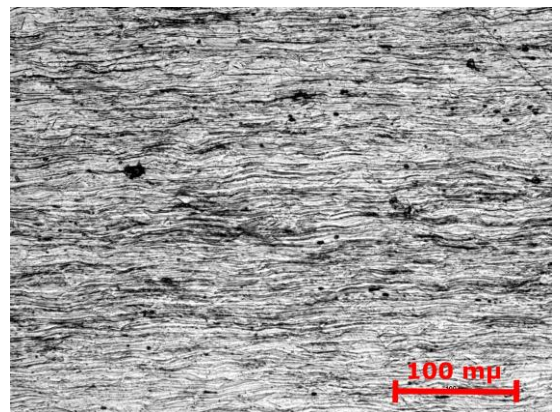
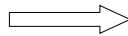


50 %

Cara Lateral-Tranversal

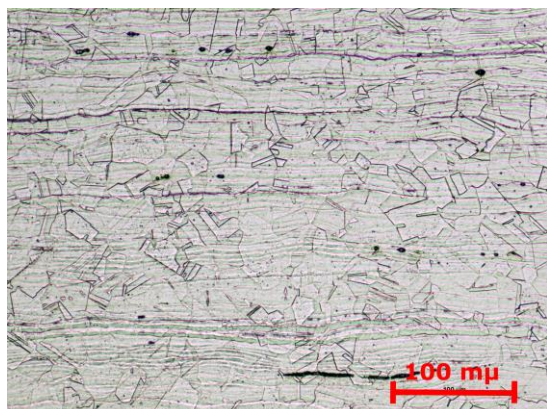


0 %

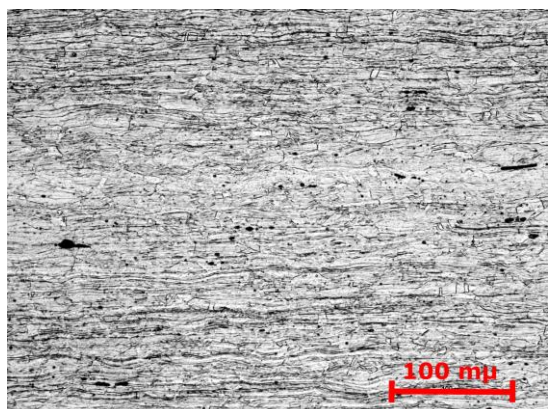
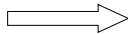


50 %

Cara Transversal



0 %

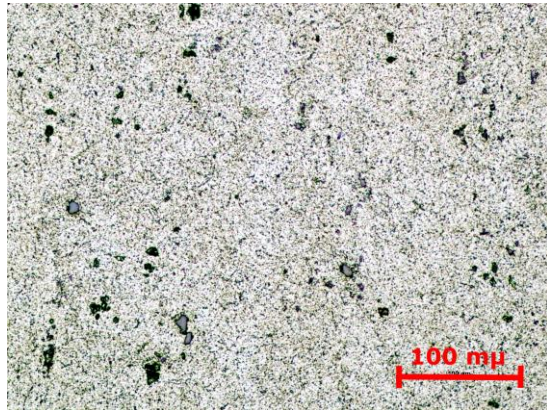


50 %

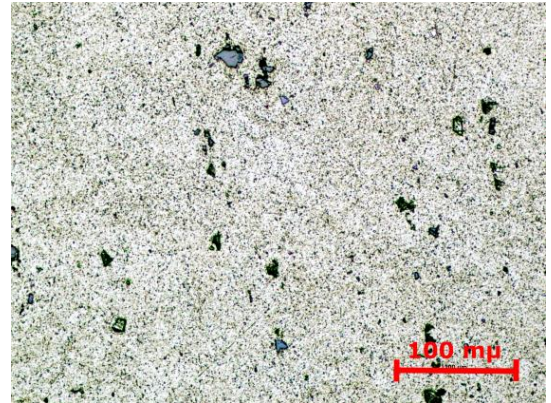
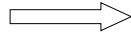
Figura 4.15. Micrografías de lámina de Acero inoxidable austenítico (AISI304) en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.

3.3.3.3 Micrografías del Aluminio

Cara Longitudinal

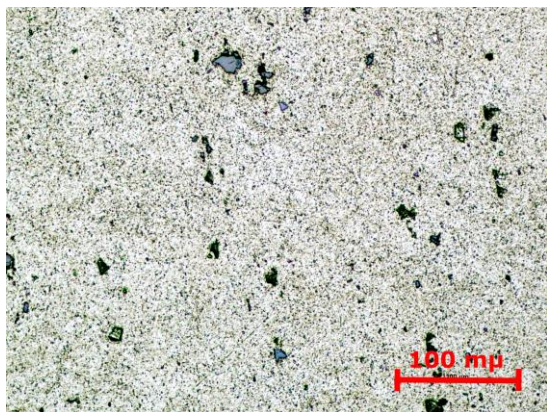


0 %

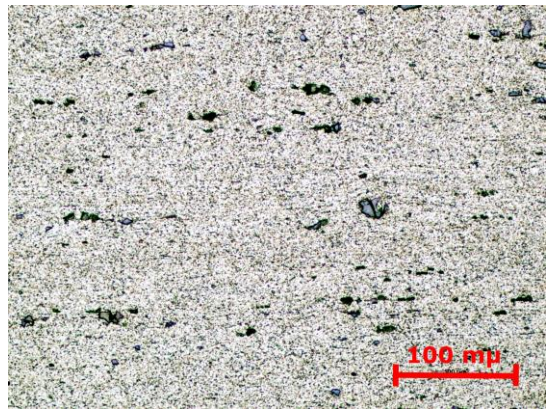
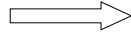


50 %

Cara Lateral-Tranversal



0 %

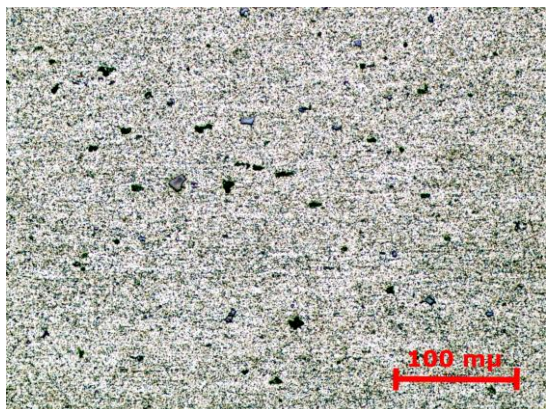
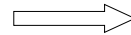


50 %

Cara Transversal



0 %

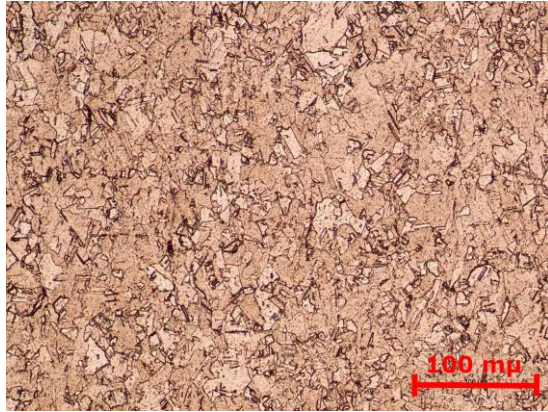


50 %

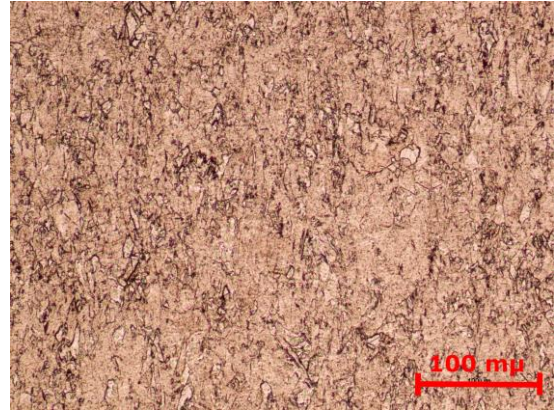
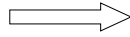
Figura 4.16. Micrografías de lámina de aluminio en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.

3.3.3.4 Micrografías del Cobre

Cara Longitudinal

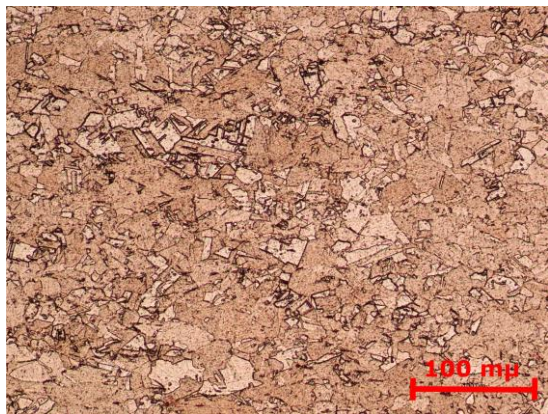


0 %

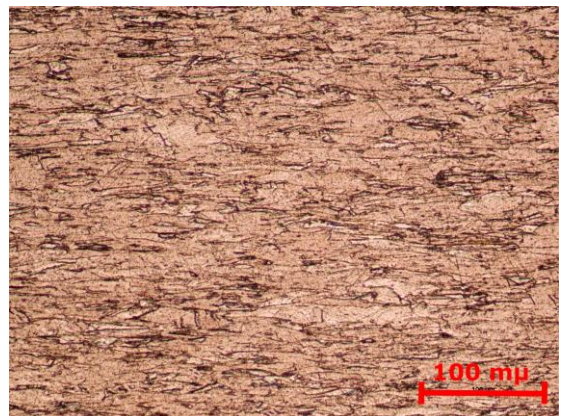
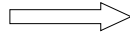


50 %

Cara Lateral-Tranversal

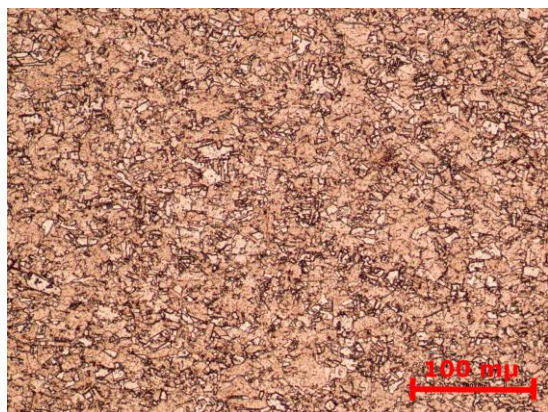


0 %

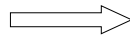


50 %

Cara Transversal



0 %

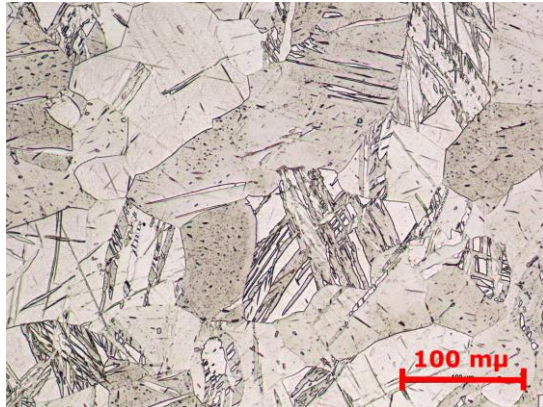


50 %

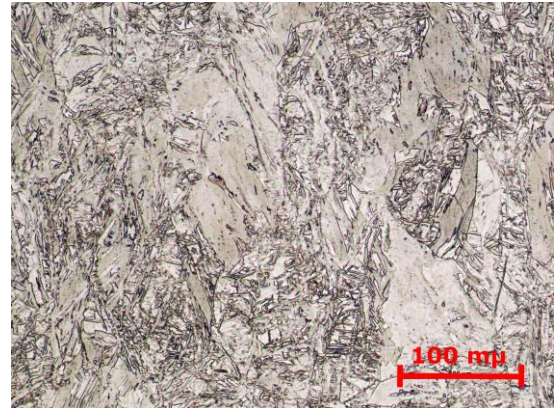
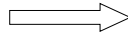
Figura 4.17. Micrografías de lámina de cobre en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.

3.3.3.5 Micrografías del Titanio

Cara Longitudinal

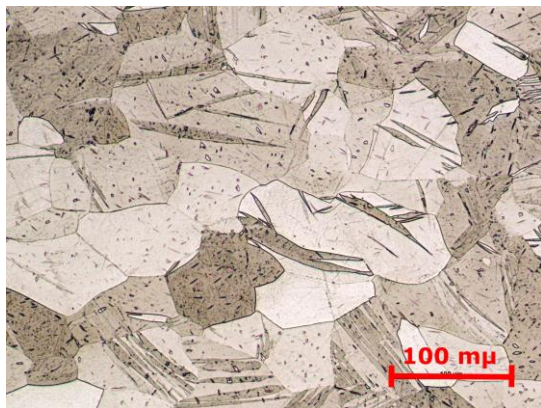


0 %

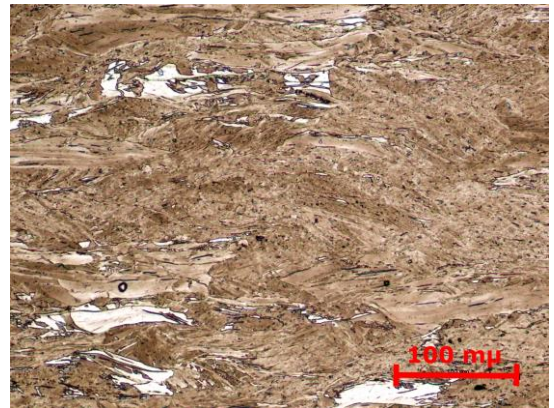
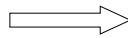


50 %

Cara Lateral-Tranversal

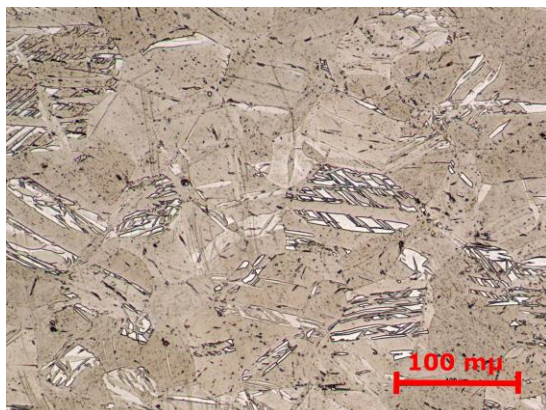


0 %

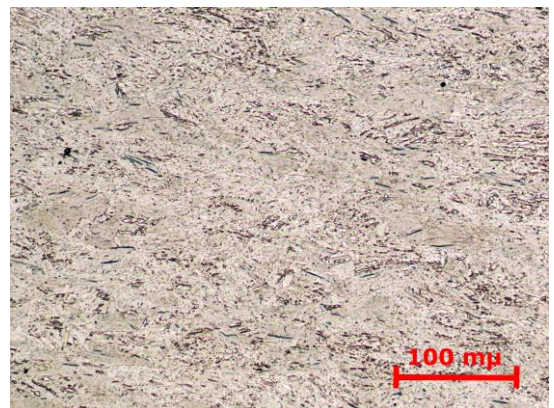
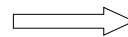


50 %

Cara Transversal



0 %



50 %

Figura 4.18. Micrografías de lámina de Titanio en sus 3 dimensiones, predeformada y tras el 50% de reducción de espesor.

4.3.4 Análisis macrográfico

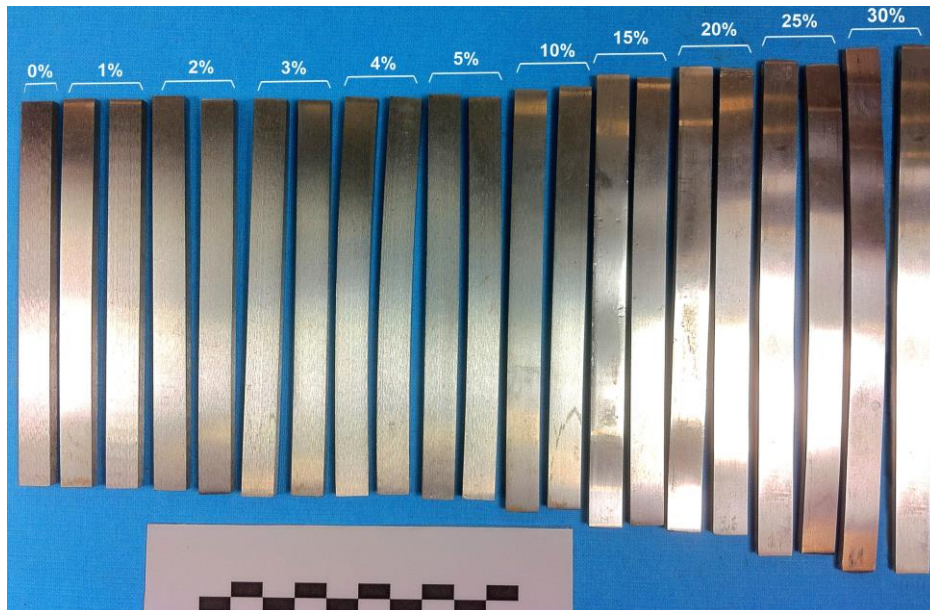


Figura 4.19. Vista de probetas en los diferentes estados de laminación, de 0% a 30%.

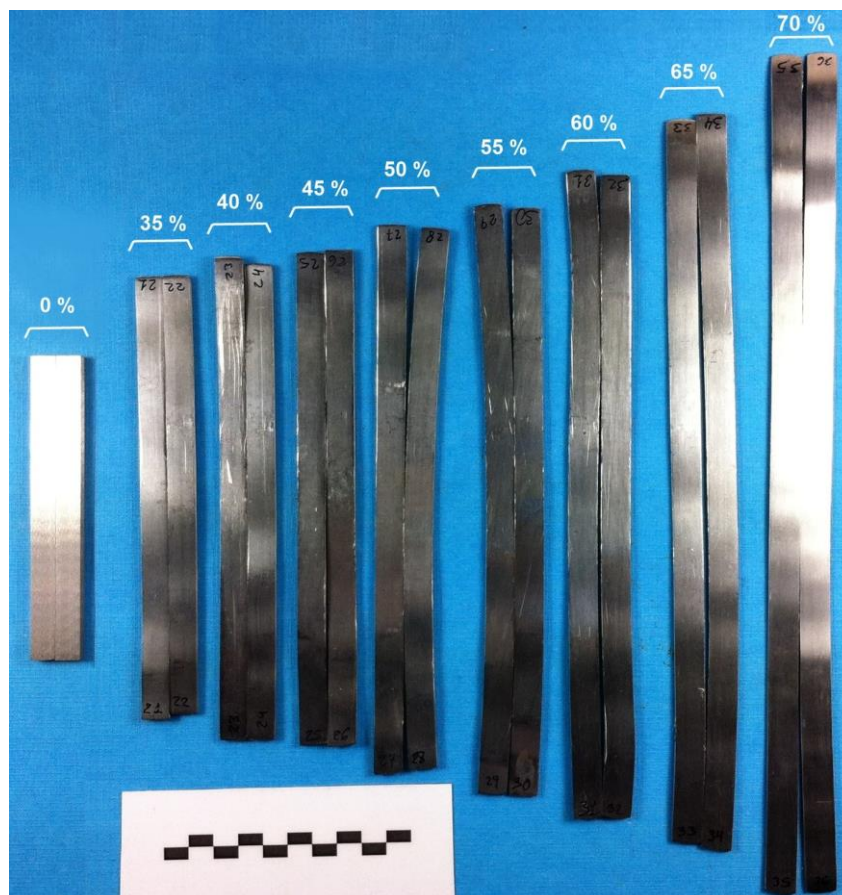


Figura 4.20. Vista de probetas en los diferentes estados de laminación, de 35% a 70%.

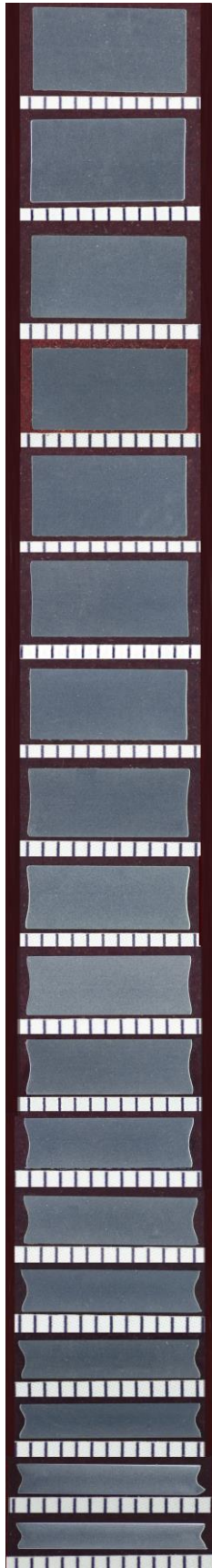


Figura 4.21. Macrografía de la sección transversal en orden descendente de reducción de espesor.

4.4 Estudio de Propiedades Mecánicas

Tras haber estimado las dimensiones finales y ver la evolución de la microestructura, procedemos a los ensayos de tracción y dureza para extraer la variación en sus propiedades mecánicas.

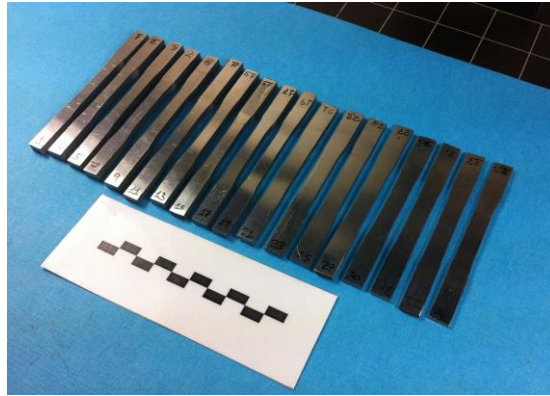


Figura 4.22. Vista de probetas para ensayo de tracción.

4.4.1 Extracción de Probetas de Tracción

Tras haber apartado de cada pareja la pieza más idónea para el ensayo de tracción, se han normalizado las probetas mecanizándolas (cortándolas y rectificándolas) para el ensayo.

4.4.2 Ensayo de Tracción

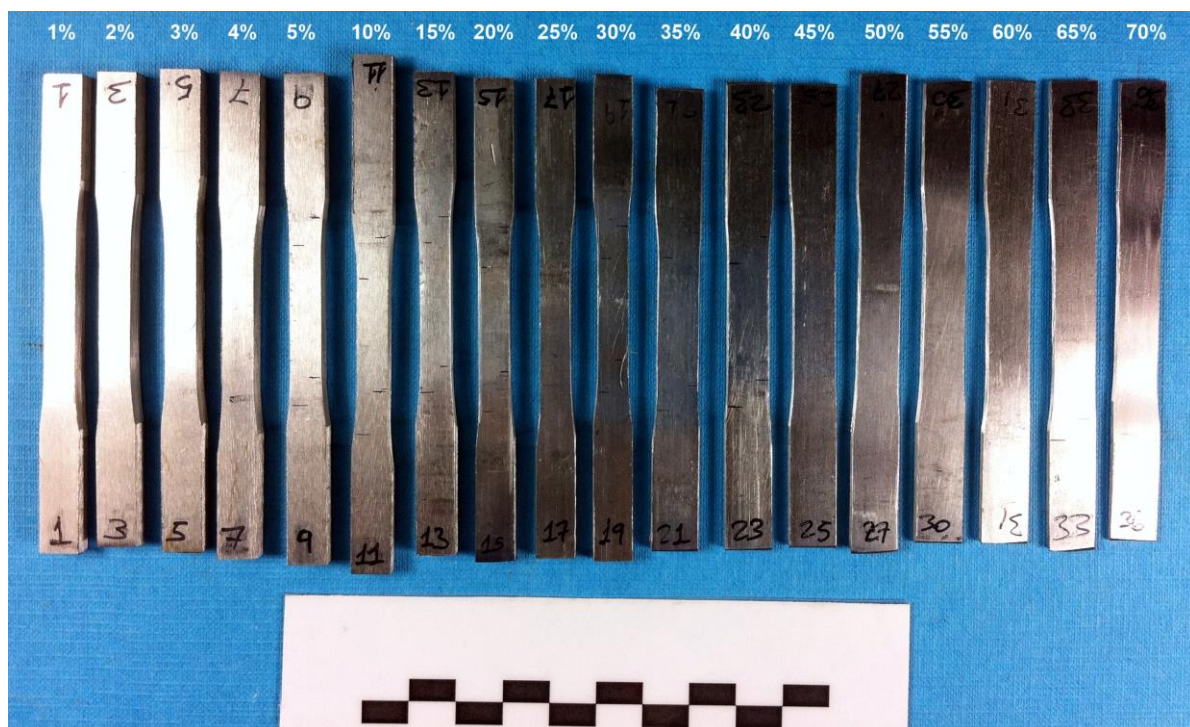


Figura 4.23. Vista de probetas para ensayo de tracción, una para cada estado de laminación.

4.4.3 Análisis de resultados de ensayo de Tracción

El ensayo se ha realizado de forma normalizada acorde a la UNE-EN ISO 6892-1:2010

El objetivo del ensayo es medir su resistencia a tracción y alargamiento para cada estado de laminación, sólo para el acero al carbono, objeto de estudio.

Tabla 4.6. Resultados de ensayos de tracción.

Reducción Durante Laminación (%)	S. inicial (mm ²)	Alargamiento (%)	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)
0	55,0	37,6	346	443
1	35,1	36,8	351	460
2	34,5	33,4	392	465
3	34,8	31,2	419	457
4	34,3	30,4	439	467
5	33,7	30,4	453	471
10	32,0	21,8	502	503
15	29,6	17,7	499	520
20	28,5	16,6	533	542
25	26,8	13,9	574	577
30	25,1	12,0	595	603
35	31,8	13,7	587	598
40	28,4	14,3	562	592
45	27,2	13,6	605	630
50	23,7	6,3	644	653
55	22,6	4,8	627	647
60	20,0	5,7	644	670
65	17,5	5,9	678	710
70	15,4	4,4	694	720

Se aprecia un aumento de la resistencia a tracción y límite elástico, así como una disminución del alargamiento, esperado tras el trabajo en frío.

Cabe mencionar que en el estado indeformado, se aprecia fluencia al final del límite elástico y que tras la deformación del 1% deja de producirse.

Al final del documento hay un anexo (ANEXO A) donde se encuentran todas las gráficas del ensayo de tracción para cada deformación



Figura 4.24. Gráfica que muestra la evolución del alargamiento con la reducción de espesor.

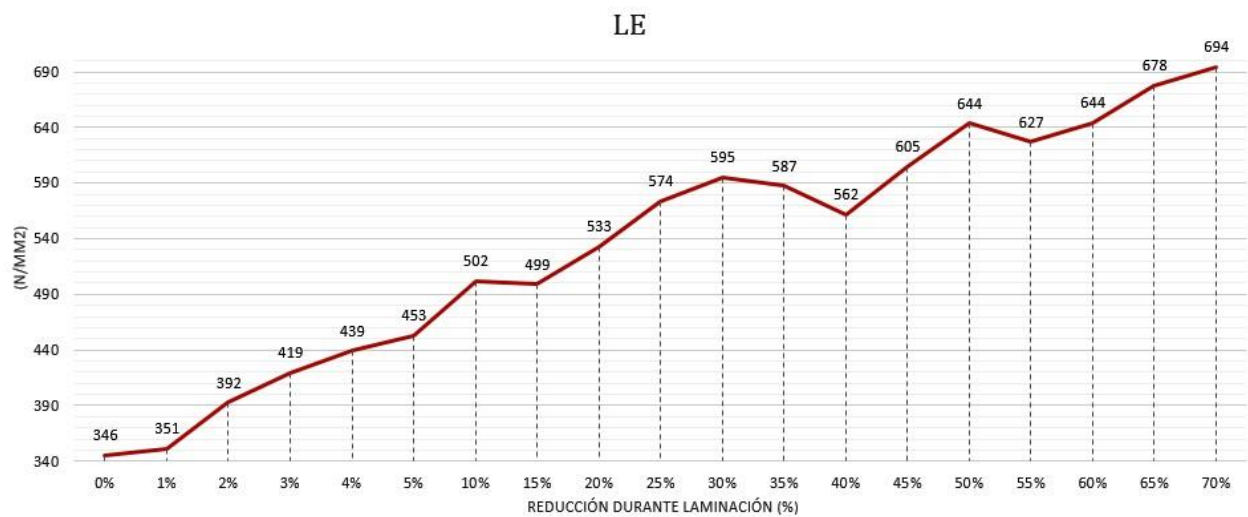


Figura 4.25. Gráfica que muestra la evolución del límite elástico con la reducción de espesor.

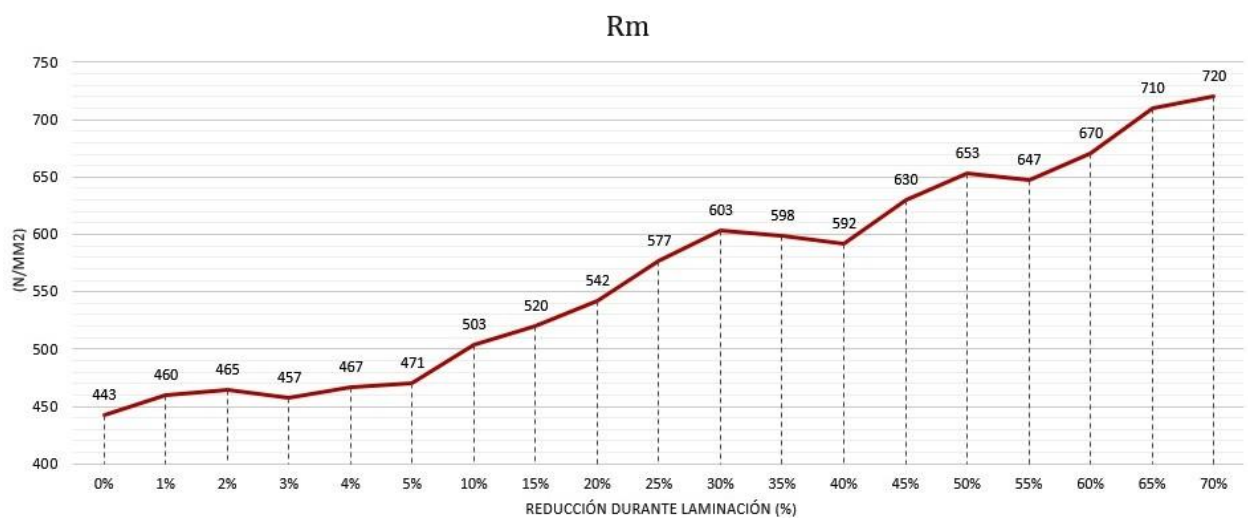


Figura 4.26. Gráfica que muestra la evolución de la carga máxima con la reducción de espesor.

4.4.4 Determinación de Durezas

4.4.4.1 Durezas del acero al carbono

La determinación de las durezas del tipo Vickers (HV10), se ha llevado a cabo en un durómetro EMCO y de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 6507:2006.

Tabla 4.7. Resultados de ensayos de dureza.

Reducción (%)	Longitudinal	Transversal	Lateral Transversal
0	168	152	152
1	155	156	155
2	170	147	152
3	175	168	146
4	177	155	190
5	172	167	153
10	185	184	179
15	187	199	201
20	190	195	193
25	200	198	201
30	202	207	205
35	202	204	225
40	201	218	210
45	206	214	212
50	207	219	227
55	210	214	212
60	219	219	229
65	223	230	217
70	218	226	231

De esta tabla extraemos las siguientes gráficas que clarifican los cambios de dureza conforme se va reduciendo el espesor.

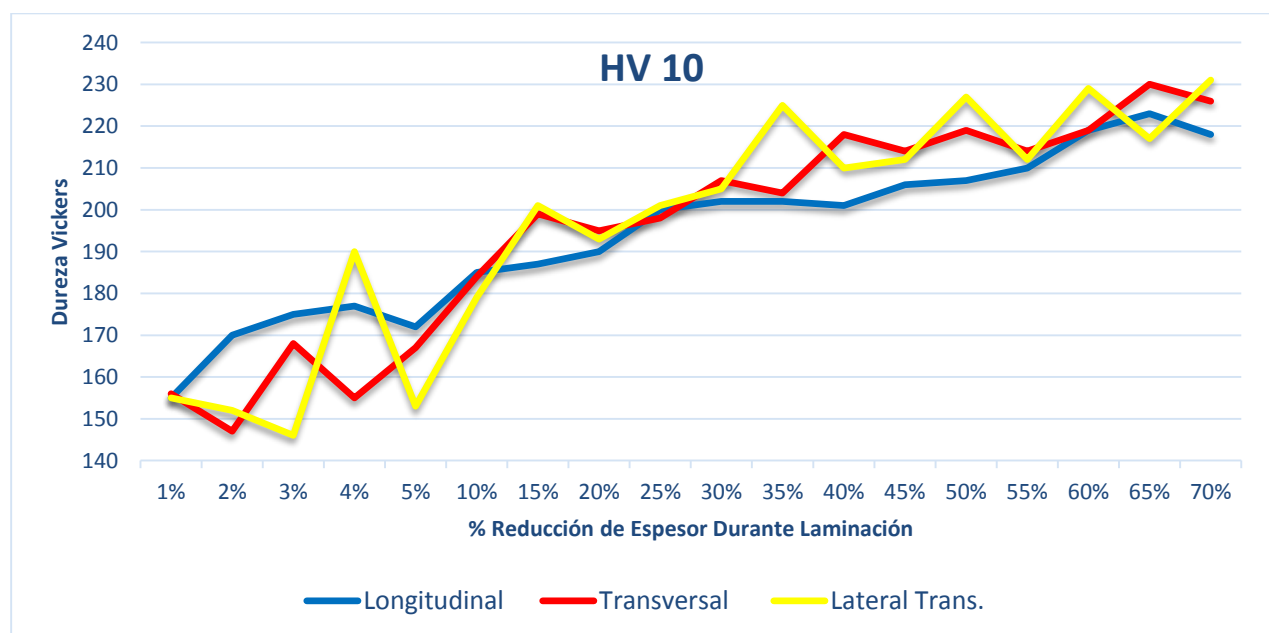


Figura 4.27. Gráfica donde se ve la evolución de la dureza en las 3 caras del acero.

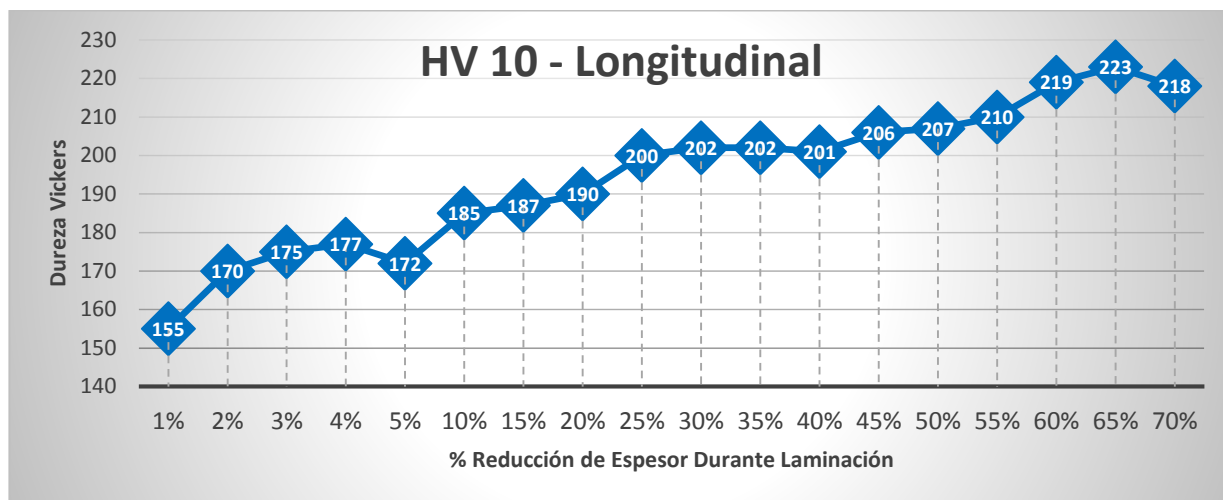


Figura 4.28. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara longitudinal del acero.

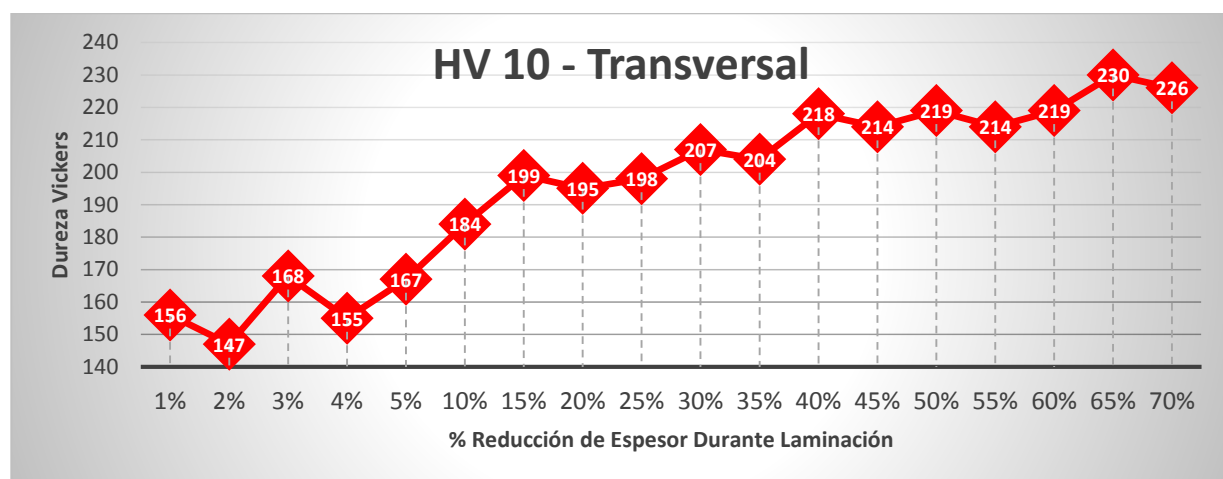


Figura 4.29. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara transversal del acero.

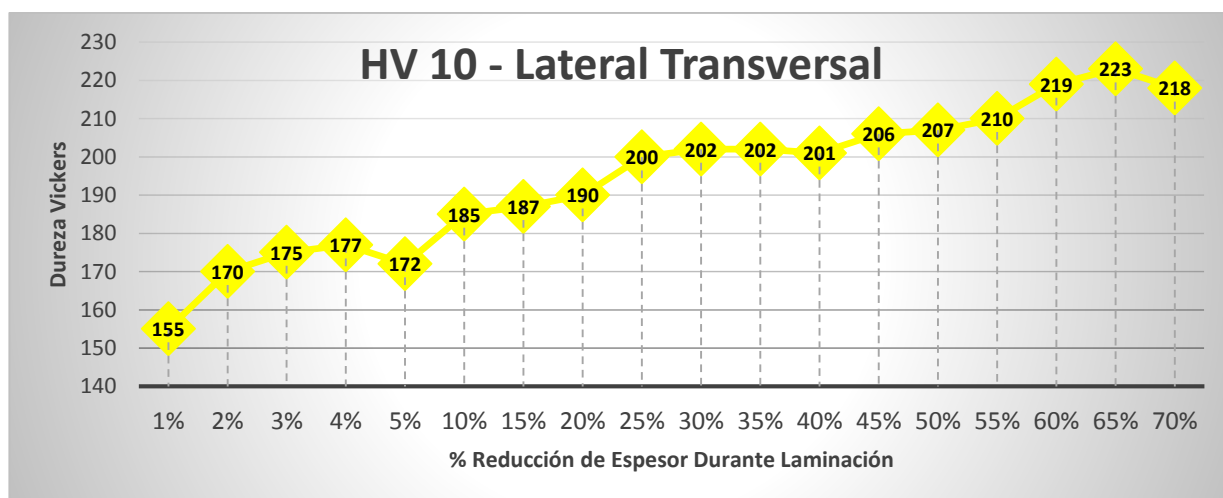


Figura 4.30. Grafica donde se ve la evolución de la dureza en la cara lateral-transversal del acero.

4.4.4.2 Durezas de metales de comparación

4.4.4.2.1 Cobre

Tabla 4.8. Dureza Vickers del cobre.

Reducción (%)	Longitudinal	Transversal	Lateral Transversal
0	50	46	44
50	111	121	118

4.4.4.2.2 Titanio

Tabla 4.9. Dureza Vickers del titanio.

Reducción (%)	Longitudinal	Transversal	Lateral Transversal
0	152	149	153
50	208	203	211

4.4.4.2.3 Aluminio

Tabla 4.10. Dureza Vickers del aluminio.

Reducción (%)	Longitudinal	Transversal	Lateral Transversal
0	47	44	45
50	110	107	109

4.4.4.2.4 Acero inoxidable (304)

Tabla 4.11. Dureza Vickers del acero inoxidable.

Reducción (%)	Longitudinal	Transversal	Lateral Transversal
0	172	173	167
50	428	400	439

A continuación se mostrarán gráficamente las diferencias de dureza antes y después de la laminación al 50% de los metales de comparación y el acero en estudio.

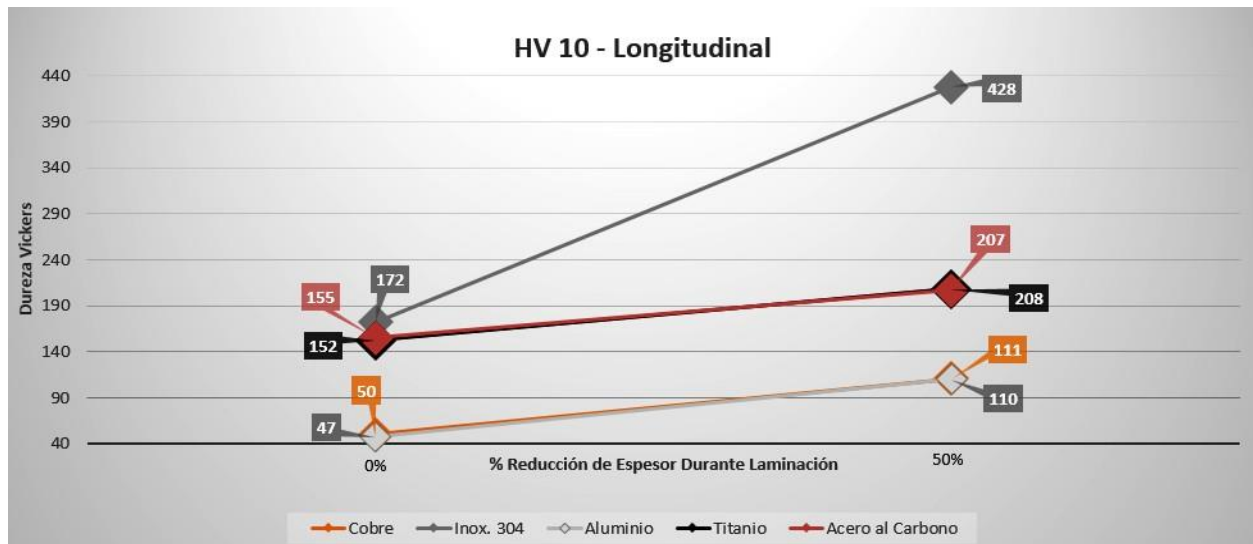


Figura 4.31. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, cara longitudinal.

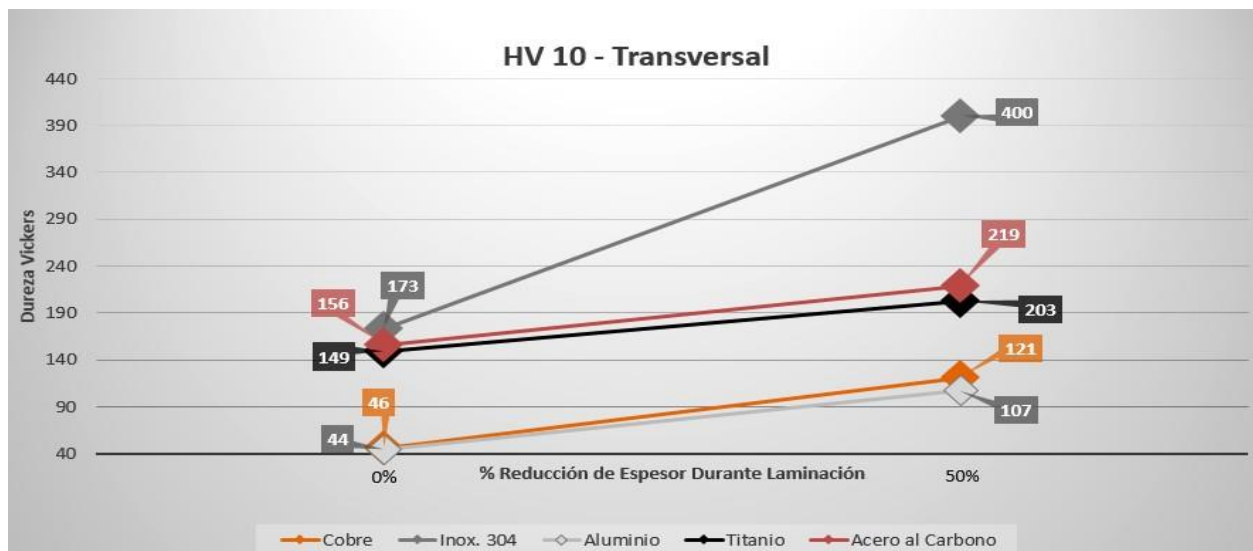


Figura 4.32. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, cara transversal.

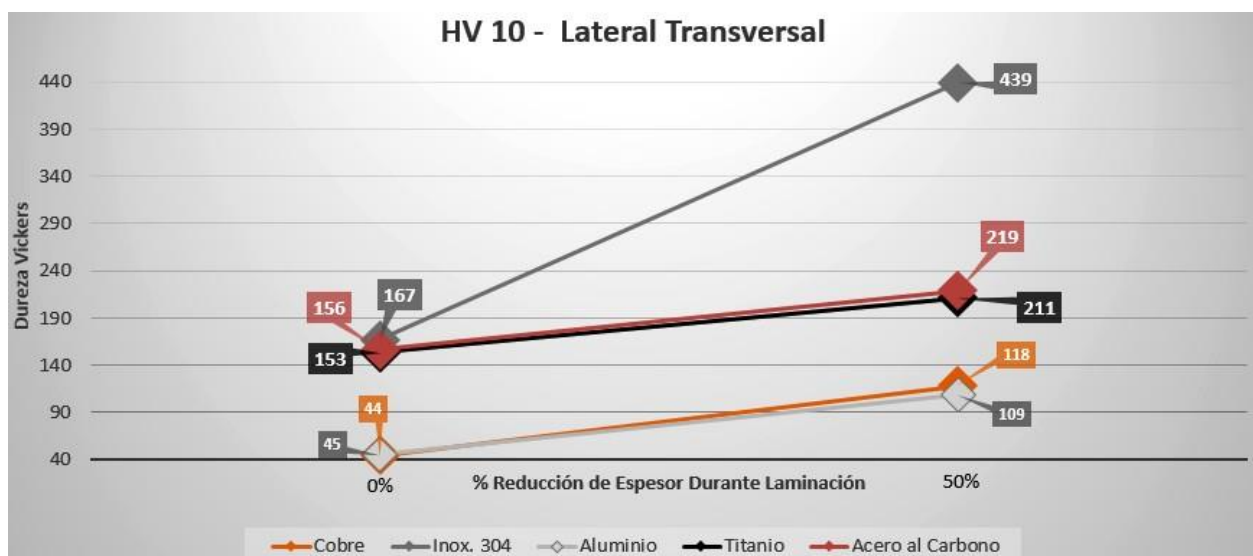


Figura 4.33. Gráfica de comparación de dureza de los metales a estudio, cara lateral- transversal.

5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Resultados

Tabla 5.1. Resultados de ensayos.

Tabla 5.1. Resultados de ensayos.															
Probeta	Acero										Metales de comparación				
	Parámetros Dimensionales				Propiedades Mecánicas						Dureza Vickers HV10				
	Espesor		Área		Superficie		Ensayo de tracción								
% hi	% hr	% CW	% S	A (%)	LE (Mpa)	Rm (Mpa)	Longitud.	Transv.	Lat. Transv.	Longitud.	Transv.	Lat. Transv.	Longitud.	Transv.	Lat. Transv.
0					37,6%	346	443	168	152	152	Cobre				
1 2	1%	1,1%	0,0%	0,4%	36,8%	351	460	155	156	155					
3 4	2%	2,4%	0,8%	0,6%	33,4%	392	465	170	147	152					
5 6	3%	2,9%	2,7%	0,8%	31,2%	419	457	175	168	146	50	46	44		
7 8	4%	3,8%	2,7%	0,9%	30,4%	439	467	177	155	190	111	121	118		
9 10	5%	4,5%	4,5%	1,0%	30,4%	453	471	172	167	153	Acero inoxidable				
11 12	10%	9,8%	7,3%	2,0%	21,8%	502	503	185	184	179					
13 14	15%	15,1%	12,0%	3,0%	17,7%	499	520	187	199	201					
15 16	20%	18,9%	14,1%	5,0%	16,6%	533	542	190	195	193	428	400	439		
17 18	25%	24,3%	18,3%	6,2%	13,9%	574	577	200	198	205	Aluminio				
19 20	30%	29,8%	23,4%	7,7%	12,0%	595	603	202	207	205					
21 22	35%	35,3%	29,9%	9,0%	13,7%	587	598	202	204	225					
23 24	40%	41,0%	34,6%	10,7%	14,3%	562	592	201	218	210	47	44	45		
25 26	45%	44,6%	36,3%	14,6%	13,6%	605	630	206	214	212	110	107	109		
27 28	50%	50,3%	41,0%	17,3%	6,3%	644	653	207	219	227	Titanio				
29 30	55%	54,6%	46,4%	17,6%	4,8%	627	647	210	214	212					
31 32	60%	59,9%	52,9%	19,6%	5,7%	644	670	219	219	229					
33 34	65%	65,0%	58,9%	20,4%	5,9%	678	710	223	230	217	152	149	153		
35 36	70%	69,6%	62,0%	23,0%	4,4%	694	720	218	226	231	208	203	211		

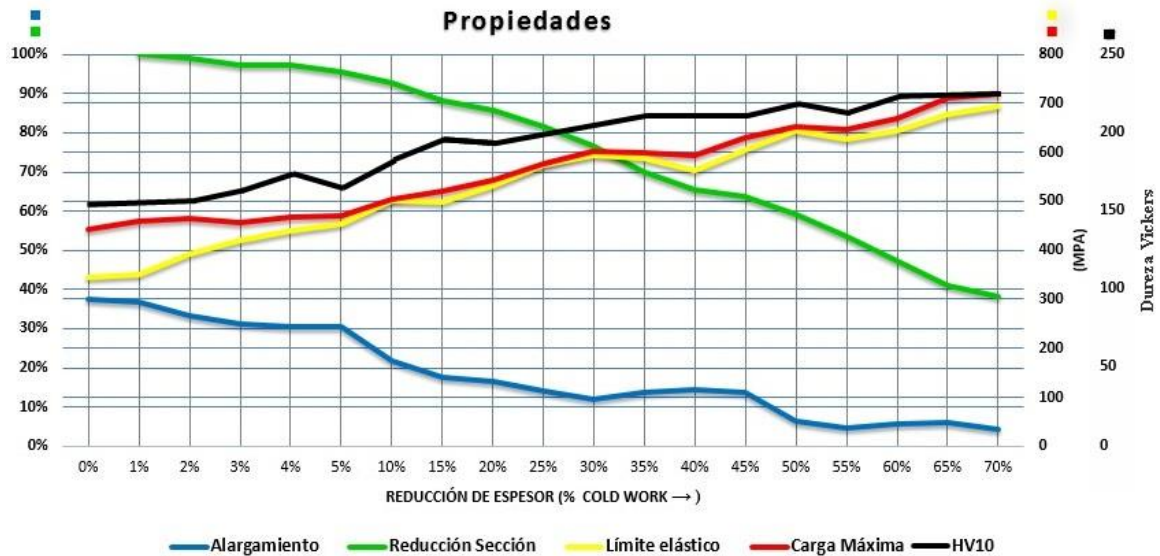


Figura 5.1. Gráfica de comparación de propiedades.

A la vista de la tabla de resultados y la gráfica que los ilustra, se comenta lo siguiente:

- La deformación paulatina del acero en porcentajes incrementales produce una alteración de las propiedades mecánicas del material, así como un cambio en su geometría.
- La sección experimenta una reducción aproximadamente lineal.
- La ductilidad, representada por el alargamiento en el ensayo de tracción experimenta un decrecimiento más o menos lineal conforme la deformación se hace más acusada.
- El límite elástico y la carga máxima aumentan prácticamente en la misma medida conforme se lamina.
- Se disminuye la región plástica y la pendiente en la curva de tracción.
- Los niveles de dureza promedio aumentan conforme se lamina.
- Existe cierta correlación entre su resistencia a tracción y su dureza, en definitiva la resistencia que el acero opone a ser deformado. R_m a tracción y la dureza a compresión (localizada).
- Los niveles de dureza van parejos en cobre-aluminio y acero-titanio, a pesar de que sus mecanismos de deformación son bien distintos.
- Mencionar el endurecimiento acusado del acero inoxidable austenítico.

Estos comportamientos son los deseados y estudiados en teoría, cuyos mecanismos que los producen se abordan en las conclusiones. Se van a ir enumerando observaciones que relacionan las prácticas afectadas con los conocimientos teóricos de cada metal. En su conjunto arrojan conclusiones de si la deformación en frío es válida y viable para cada metal.

5.1.1 Acero

5.1.1.1 Identificación

A la vista de las micrografías y teniendo en cuenta el análisis químico de la tabla 8 en conjunto con las propiedades mecánicas obtenidas mediante ensayo de tracción en la tabla 13, se puede concluir que se trata en efecto de una chapa de acero estructural AISI-1016 laminado en caliente, identificado mediante ASM HANDBOOK volumen 1.

La identificación del material llevada a cabo es crucial en la industria, dado que es esencial corroborar que el material utilizado para el cometido en cuestión, es en efecto el deseado. Gracias a la normalización de los materiales, es posible la selección y empleo de los mismos de forma más eficiente y precisa. También se hace necesario para la validación de los materiales cuando se hace la recepción de los mismos y asegurar las buenas prácticas entre empresas.

5.1.1.2 Características y microconstituyentes

Las micrografías de la figura 4.11 revelan una microestructura constituida por ferrita y perlita, con tamaño de grano uniforme de 10.

La **perlita** es un microconstituyente bifásico. Está formado por granos alargados (considerando las tres direcciones son láminas) de cementita en una matriz ferrítica. Cuando esta estructura laminar es muy fina (las láminas son muy delgadas) la perlita se ve al microscopio óptico como negra. Sin embargo ambas fases, ferrita y cementita, en condiciones normales de ataque son blancas. El color oscuro o negro lo producen el gran número de límites de grano existentes entre la matriz ferrítica y las láminas de cementita. Se comprende que cuanto más anchas sean las láminas (se habla entonces de perlita abierta o basta) la tonalidad se irá aclarando hasta poder distinguirse las distintas láminas, no por ello la perlita pierde su carácter de microconstituyente. [13]

La **ferrita** es una solución sólida intersticial de carbono en una red cúbica centrada en el cuerpo de hierro. Admite hasta un 0,021 % C en solución a la temperatura eutectoide. Es el constituyente más blando del acero. Su resistencia es de 28 Kg/mm² (2,7 MPa). Es ferromagnético siendo su temperatura de Curie 768°C.

A partir de esta temperatura hasta los 910°C su comportamiento es paramagnético, por lo que antigua y equivocadamente se le creyó otra fase denominándosele hierro beta. La morfología y estructura granular de la ferrita es muy variada pudiéndose encontrar hasta 24 términos descriptivos de la misma. [13]

Se trata de un acero hipoeutectoide, en el que la ferrita es su constituyente matriz y por ello el límite elástico y la carga de rotura aumentarían con un aumento del contenido en carbono. Su deformabilidad en frío (Alargamiento), así como su tenacidad, disminuyen al aumentar el porcentaje de carbono. [26]

La tasa de endurecimiento es más baja en hexagonal compacta que en cúbicos. Por lo que el endurecimiento con perlita es mayor que con Cementita.

Para poder laminar en frío las estructuras ferritoperlíticas, se requiere escasa proporción de perlita, o lo que es lo mismo, que el contenido de carbono sea bajo (%C<0,1). [26]

5.1.1.3 Mecanismo de deformación

La deformación plástica es debida al movimiento de las dislocaciones, que permiten la deformación a mucha menor tensión que en un cristal perfecto.

El número de dislocaciones crece drásticamente durante la deformación plástica, creciendo desde dislocaciones ya existentes, bordes de grano y superficies. Se reduce la distancia entre ellas y se apilan bloqueando el movimiento entre ellas.

La habilidad de deformarse depende de la capacidad de las dislocaciones de moverse y restringiendo el movimiento de las mismas se refuerza el material.

La mayoría de materiales cristalinos, especialmente metales, tienen dislocaciones en su estado preformado, como resultado de tensiones (mecánicas, térmicas) asociadas con el proceso de conformado.

Dentro de los planos de deslizamiento hay direcciones cristalográficas preferentes para el movimiento de la dislocación. El conjunto de planos y direcciones constituye el sistema de deslizamiento. Son los de mayor densidad de empaquetamiento. El movimiento de dislocación ocurre a lo largo del sistema de deslizamiento con orientación favorable.

La orientación de los granos con respecto a las cargas aplicadas es aleatoria y se produce la elongación de los mismos en la dirección del esfuerzo.

Algunos granos no están favorablemente orientados respecto a la carga aplicada. Para los granos con orientación a favor, hay que tener en cuenta que también están limitados por los granos adyacentes.

Las dislocaciones no pueden cruzar bordes de grano fácilmente debido a los cambios en la dirección de los planos de deslizamiento y el desorden atómico en los bordes de grano.

Como resultado, los metales policristalinos son más resistentes que los monocristales (a excepción de los monocristales perfectos sin defectos).

Los metales dúctiles se refuerzan cuando son deformados plásticamente a temperaturas muy por debajo del punto de fusión, como ocurre con este acero. [15]

5.1.2 Acero inoxidable

El acero inoxidable austenítico, en este caso AISI 304 o 1.4301, presenta una microestructura de granos en macla. Ha sido obtenido por laminación más recocido. Se observa la dirección de laminación en la microestructura de la figura 4.15.

Son aceros en los que se pueden alcanzar gran dureza y resistencia por medio del trabajo en frío, que se traduce en un aumento de la resistencia a tracción y del límite elástico. Para grandes deformaciones, se hace necesario un tratamiento térmico adicional para reestablecer ciertas propiedades como la ductilidad.

Contiene cantidades notables de cromo y níquel, el primero para la autopasivación de su capa externa de óxido que le otorga resistencia a la corrosión y el segundo que estabiliza la fase austenítica, de estructura cúbica centrada en las caras.

Las maclas se identifican microestructuralmente como subgranos estrechos con bordes bastante rectilíneos y paralelos que dividen el monocristal inicial.

Puede deducirse de esta casuística que:

- La macla tiene la misma composición y estructura del grano en que se halla inmersa.
- La velocidad de formación de la macla es muy alta, repentina.
- Sucede habitualmente cuando la probeta ha sufrido ciertos niveles de deslizamiento.
- Cada macla que se forma obliga a elevaciones superiores de la tensión aplicada para conseguir aumentar la deformación.

El maclaje es un movimiento de planos de átomos en la red, paralelo a un plano específico, de maclaje, de manera que la red se divide en dos partes simétricas diferentemente orientadas. La cantidad de movimiento de cada plano de átomos en la región maclada es proporcional a su distancia del plano de maclaje, de manera que se forma una imagen especular a través del plano de maclaje.

Las maclas se forman como resultado del esfuerzo cortante aplicado en dirección paralela al plano de maclaje y que queda en la dirección de maclaje. La componente del esfuerzo axial, normal al plano de maclaje, no tiene importancia en la formación de la macla. Al contrario que el deslizamiento, el esfuerzo cortante requerido para poder formarse una macla no es invariante respecto al plano de maclado, sino que pueden requerirse distintos valores en un campo bastante amplio.

En coherencia con esta tensión cortante variante, se ha evidenciado por experiencias que los centros de nucleación para maclaje son posiciones de tensiones muy localizadas en la red. Significa que las maclas se forman solamente en metales que han sufrido deformación previa por deslizamiento.

Y justifica la condición necesaria para la nucleación de maclas: impedir el proceso de deslizamiento, formando barreras que prevengan el movimiento de dislocaciones en ciertas áreas restringidas.

El crecimiento de las maclas es, primordialmente, función del esfuerzo requerido para su nucleación. Este actúa en las formas siguientes:

- Si se nuclean las maclas a esfuerzos muy bajos, el esfuerzo requerido para su crecimiento será del mismo orden de magnitud que el esfuerzo de nucleación.
- Si se forman las maclas bajo condiciones que resulten en niveles de esfuerzos muy elevados antes de la nucleación, el esfuerzo por crecimiento puede ser mucho menor que por nucleación. Cuando éste sucede, las maclas crecen con mucha rapidez, tan pronto como son nucleadas.

El maclado es un proceso de endurecimiento que siempre va asociado al deslizamiento, no puede considerarse por tanto independientemente. Esto significa que hay que considerarlo como mecanismo secundario al deslizamiento, y el endurecimiento que consigue debe ser consecuencia de multiplicar las acciones del endurecimiento por deslizamiento.

En este sentido se justifica que las maclas incrementan el endurecimiento por:

- Dividen en tres partes la dimensión de los granos, con la incidencia que vimos tenía el tamaño de grano.
- Bloquea las dislocaciones que en ese momento estuvieran actuando en el monocristal con la consiguiente inhibición del deslizamiento.
- Dificulta el movimiento de bordes de grano por la propia resistencia a compresión que impone la macla cuando el grano tiende a su estirado.

En consecuencia, el maclado es un mecanismo de endurecimiento que potencia la inhibición de flujo plástico por deslizamiento, por partición del grano y bloqueo de los bordes. [17]

Se concluye que esta práctica en los aceros inox. austeníticos (AISI 304) es viable y ampliamente extendida en la industria.

El estudio de los aceros inoxidable o autopasivables es complejo y tiene su ciencia propia, por lo que en este caso no se profundizará más en su mecanismo de deformación, dado que no es el objeto de estudio. Se tendrá en cuenta para comparar los niveles de dureza con el acero, principal metal sometido a estudio en este trabajo.

5.1.3 Aluminio

El aluminio es del tipo empleado en aplicación estructural y en calderería y se ha obtenido por laminación.

A la vista de la microestructura, se pueden apreciar segundas fases dispersas (compuestos intermetálicos) típicas de aleaciones de aluminio para forja, deformadas y posteriormente sometidas a tratamiento térmico.

Estos compuestos, en los que normalmente se contiene impurezas como hierro o silicio, pueden ser los compuestos insolubles $(\text{Fe,Mn})\text{Al}_6$, FeAl_3 , $\alpha\text{-Al}(\text{Fe,Mn,Si})$, $\text{Al}_7\text{Cr}_2\text{Fe}$ y otras fases más solubles como son CuAl_2 , Mg_2Si y Al_2CuMg . [16]

Se produce cierto alineamiento en las caras transversales de los precipitados más finos en la dirección de laminación, pero no se aprecian diferencias notables en la microestructura. Se concluye que esta práctica es viable en aluminio, hecho que se comprueba por su gran aplicación en la industria dando productos directamente terminados.

El estudio del aluminio y sus aleaciones es complejo y tiene su ciencia propia, por lo que en este caso no se profundizará más en su mecanismo de deformación, dado que no es el objeto de estudio. Se tendrá en cuenta para comparar los niveles de dureza con el acero, principal metal sometido a estudio en este trabajo.

5.1.4 Cobre

El cobre ensayado es para aplicación eléctrica y se ha obtenido por recocido más posterior deformación plástica (trefilado). Se observan en su estado final maclas, cuyo mecanismo comparte similitudes con el abordado en el acero inoxidable austenítico. Por lo tanto el cobre es un metal viable para la deformación en frío.

El estudio del cobre y sus aleaciones es complejo y tiene su ciencia propia, por lo que en este caso no se profundizará más en su mecanismo de deformación, dado que no es el objeto de estudio. Se tendrá en cuenta para comparar los niveles de dureza con el acero, principal metal sometido a estudio en este trabajo.

5.1.5 Titanio

El titanio en su origen era un cilindro tubular y su aplicación puede ser muy variada, desde hidráulica para aplicación aeronáutica a central nuclear. Se trata de una aleación alfa-beta, cuya designación es desconocida en recepción, pero se especula que puede ser $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V.

Los procesos de trabajo en caliente y tratamientos térmicos de esta aleación permiten obtener microestructuras muy variadas:

- martensítica (fase β metaestable),
- globular (fina, grano basto),
- *necklase* (fina, grano basto),
- laminar (fina, grano basto),
- bifásica (con variación de fracción volumétrica y dispersión de fase α).

En la micrografía se aprecia la morfología bifásica con un tamaño de granos razonablemente grande, lo que refleja un recocido extenso, para aliviar las tensiones durante el conformado del tubo. Se observa en las micrografías deformadas posible transformación de β en martensita α'' por la acción de la tensión (fig. 4.18).

Tiene dos formas alotrópicas, α con estructura hexagonal compacta y β con estructura cubica centrada en el interior. Cada una de ellas exhibe una plasticidad diferente como resultado de sus distintas estructuras y sus planos de deslizamiento.

Alrededor del 90% de los 70 grados de aleación de titanio que se producen por métodos convencionales son martensíticas de 2-fases o aleaciones de transición. Exhiben resistencia relativamente alta, buena resistencia al creep, buena resistencia a corrosión bajo tensión, buena soldabilidad y conformado. El más representativo es el Ti-6Al-4V, que posee un buen balance de propiedades mecánicas y tecnológicas.

La aplicación de trabajo en frío está limitada a doblado (láminas, tochos, tubos y barras) y embutición, pero en rasgos generales, el conformado en frío del titanio a gran escala no está implementado debido a la alta resistencia del titanio al flujo plástico. [25]

El titanio comercialmente puro (CP) y la mayoría de sus aleaciones en estado recocido, tienen una capacidad limitada para ser trabajados en frío. En el caso del doblado, el radio de curvatura para de CP es 1-3 veces el espesor de la lámina, 2-4 para aleaciones beta y 3-6 para la mayoría de otras aleaciones.

Un problema importante es la recuperación elástica excesiva, consecuencia de los bajos módulos y altos flujos de tensiones en el titanio y sus aleaciones.

Para mejorar la precisión dimensional, el trabajo en frío va seguido por un redimensionado en caliente y un alivio de tensiones.

Dichos tratamientos, pueden también ayudar a reestablecer las propiedades mecánicas en ciertas direcciones, dado que se produce anisotropía. [16]

Se concluye que esta práctica es de relativa viabilidad en los titanios.

El estudio del titanio y sus aleaciones es complejo y tiene su ciencia propia, por lo que en este caso no se profundizará más en su mecanismo de deformación, dado que no es el objeto de estudio. Se tendrá en cuenta para comparar los niveles de dureza con el acero, principal metal sometido a estudio en este trabajo.

5.2 Conclusiones

- En primer lugar, mencionar que se obtienen excelentes tolerancias dimensionales y acabados superficiales a través de este proceso si es realizado de forma competente y evitando la aparición de defectos asociados a esta práctica.
- Un material se considera trabajado en frío si sus granos están en una condición distorsionada después de finalizada la deformación plástica. Todas las propiedades de un metal que dependa de la estructura reticular se ven afectadas por la deformación plástica o por el trabajo en frío.
- La resistencia a la tensión y la dureza aumentan, mientras que la ductilidad, representada por el % de alargamiento, disminuye, observando los resultados obtenidos.
- Durante la deformación se produce una estructura fibrosa conforme los granos dentro del material se alargan. Los granos giran alargándose también, causando que algunas direcciones y planos cristalográficos se alineen. En consecuencia, se desarrollan orientaciones preferenciales o texturas, este efecto produce un comportamiento anisotrópico.
- En el laminado estudiado, se producen tanto direcciones, como planos preferentes, generando una textura de capas superpuestas.
- Las propiedades de un laminado, dependen de las direcciones en las que se aplica el esfuerzo, por lo que se puede provocar un colapso, si el esfuerzo no es aplicado en la dirección preferente. La textura aumenta su intensidad conforme se incrementa la cantidad de deformación.
- Cualquier inclusión o grano de segunda fase presente en la estructura original, se alinea también durante la deformación. Las inclusiones blandas normalmente se deforman y alargan las duras pueden no deformarse, pero se alinean en la dirección de deformación. Estas pueden provocar alteraciones en las propiedades finales, siendo deseadas o indeseadas.
- A temperatura ambiente, los mecanismos responsables de la deformación plástica de cristales son el deslizamiento y maclado. La activación de uno de estos mecanismos o ambos y el orden en que se activen depende de la estructura cristalina del material.
- Durante la deformación la densidad de dislocaciones aumenta de forma considerable. La interacción de las dislocaciones de cuña y de tornillo, crea anillos de dislocación que se generan en planos de deslizamiento.
- La conjunción de un gran número de fuentes como estas, crea un aumento de las intersecciones entre dislocaciones facilitando la formación de codos. Por ello se requiere un esfuerzo creciente para continuar la deformación. Este es el fundamento del mecanismo de endurecimiento por deformación.
- Distintos metales tienen diferente capacidad para endurecerse cuando se deforman plásticamente. El endurecimiento por deformación tiene un límite natural para cada aleación, ya que se deforma el material hacia su límite de resistencia.
- El número de dislocaciones que pueden desarrollar una red cristalina es limitada y, por lo tanto, también lo es su máxima resistencia.
- A medida que aumenta el endurecimiento por deformación, el metal puede soportar el aumento de la carga sin romper; pero conserva menos resistencia contra esfuerzos adicionales.
- Un metal trabajado en frío a su límite máximo, puede colapsar por una ligera deformación adicional.
- Por lo tanto, el trabajo en frío, o endurecimiento por deformación, se aplica en la medida requerida por las especificaciones del producto que implica un equilibrio entre la fuerza máxima y la máxima ductilidad.
- Todos los cambios asociados a la deformación plástica en frío pueden ser revertidos utilizando el tratamiento térmico apropiado
- Un posterior recocido alivia las dislocaciones de la estructura reticular distorsionada y permite que se reforme de nuevo en planos relativamente sin dislocaciones, restaurando la ductilidad a costa de la resistencia adquirida.

- Las ventajas y limitaciones del trabajo en frío son las siguientes:
 - Se puede endurecer y dar geometría final al material de forma simultánea.
 - Se obtienen excelentes tolerancias dimensionales y acabados superficiales.
 - Es un proceso de bajo coste para grandes producciones de piezas pequeñas, pero para piezas grandes la cantidad de trabajo en frío es limitada. Se requerirían equipos de conformado costosos y de grandes capacidades, dado que los esfuerzos serían cada vez mayores.
 - Por lo general, la ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión se deterioran por el trabajo en frío. Sin embargo el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica en menor grado que los demás procesos de endurecimiento.
 - Los esfuerzos residuales y el comportamiento anisotrópico pueden generarse durante el trabajo en frío, efecto que puede ser de utilidad en función de la aplicación.
 - Los metales trabajados en frío, son usados en ambientes en donde las temperaturas de trabajo no son elevadas, dado que las propiedades se verían afectadas.

- Tras todo lo estudiado, es comprensible que el consumo de laminados en frío supone cerca del 40% de la producción mundial de aceros. Aproximadamente la mitad de ese consumo corresponde a productos planos revestidos con estaño (hojalata, espesor entre 0,1 mm y 0,5 mm) o zinc (galvanizado, espesor entre 0,5 mm y 3 mm). El resto de la producción (Cold rolled) se destina a carrocerías, tubos, electrodomésticos, envases, muebles, etc.

[14][15][16][18][19][20][21][22][25][26][27]

REFERENCIAS

- [1] <http://www.worldsteel.org> , worldsteel Committee on Economic Studies – Brussels, 2014.
- [2] <http://www.asgco.com/industries/steel-industry-information/>.
- [3] William F. Smith y Javad Hashemi, 2006, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de Materiales, pág. 200.
- [4] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, 2008, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5ta Edición, págs. 150, 151, 152.
- [5] Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 13. Titanio. Salvat Editores S.A.
- [6] <http://euroamericaimport.com/>.
- [7] <http://aluminio.org/>.
- [8] <http://www.wallstreetdaily.com>.
- [9] <http://chemistry.about.com/>.
- [10] <http://euroamericaimport.com/>.
- [11] <http://www.knowledge.goic.org.qa/>.
- [12] <http://www.hdsteeldgroup.com/>.
- [13] <http://www.mim-us.es>.
- [14] Suranaree University of Technology.
- [15] MSE 2090: Introduction to Materials Science Chapter 7, Strengthening.
- [16] I. J. Polmear , Light Alloys.
- [17] <http://www.upv.es/>.
- [18] Askelan, Ciencia y materiales para ingeniería.
- [19] Avner, Materiales para ingeniería.
- [20] Trabajo en frío y sus distintas aplicaciones, Gustavo Adolfo Quispe Chino, Aux. de Ingeniería de Materiales, Universidad de San Andrés.
- [21] <http://www.aluminum.org/>
- [22] Brick, Pense and Gordon, Structure and Properties of engineering Materials.
- [23] <http://metals.about.com/>
- [24] <https://www.santarosa.edu>
- [25] Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys Maciej Motyka, Krzysztof Kubiak, Jan Sieniawski and Waldemar Ziaja Department of Materials Science, Rzeszow University of Technology, Poland.
- [26] José Antonio Pero-Sanz Elorz, Aceros: metalurgia física, selección y diseño, 2004
- [27] PFC-Fenómenos de Recristalización en dos aceros inoxidables austeníticos con diferente energía de defectos de empaquetamiento, M^a Amparo Martín Franco, 1997.

ANEXO I: GRÁFICAS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN

I.1 Acero al carbono sin deformar

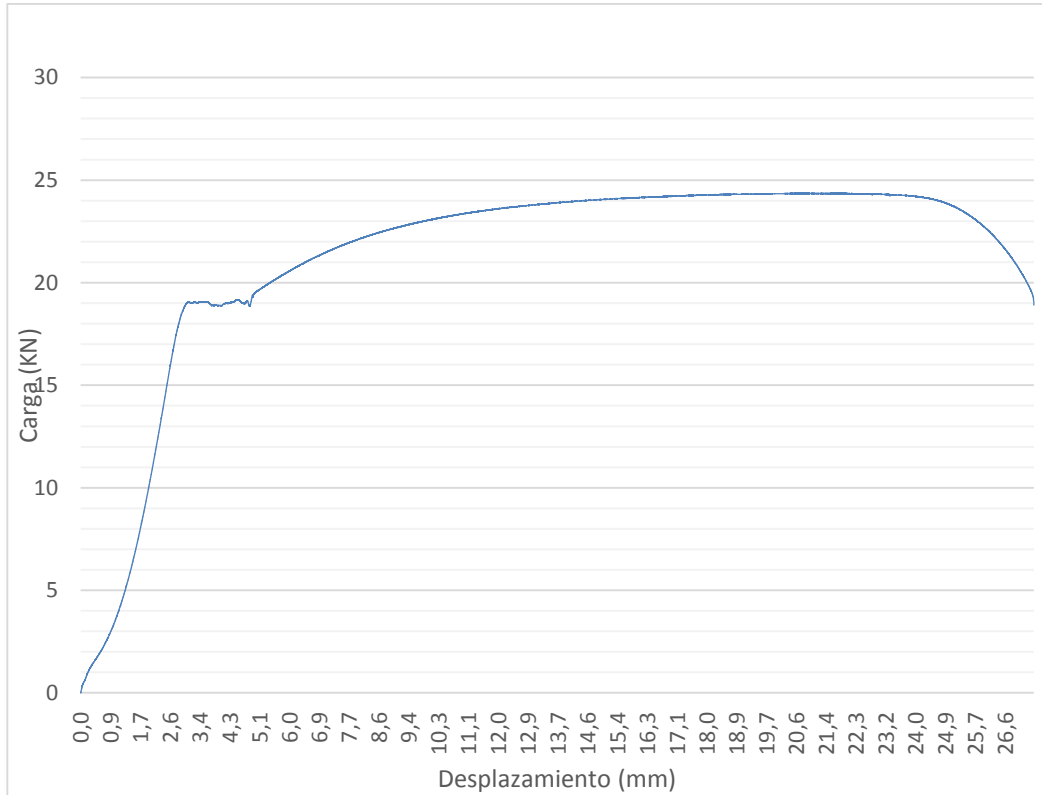


Figura A.1. Gráfica de ensayo de tracción 0% reducción de espesor.

Tabla A.1. Propiedades Mecánicas, 0% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
0%	346	443	29,8

I.2 Acero al carbono 1% de deformación

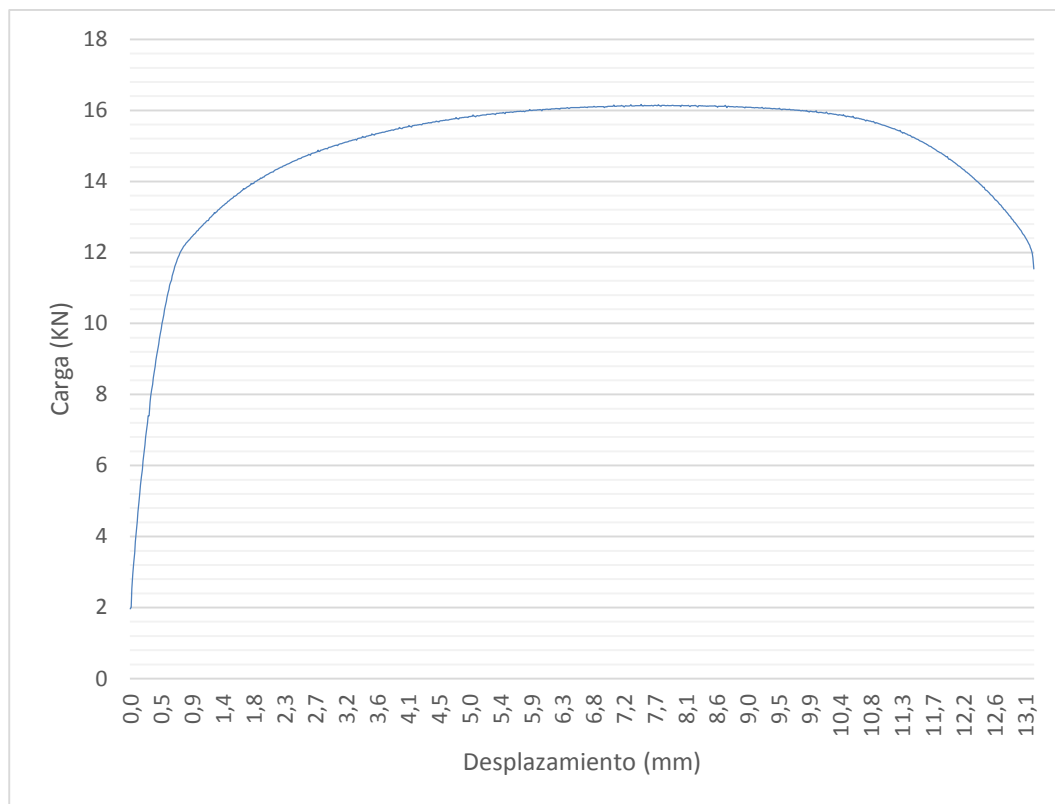


Figura A.2. Gráfica de ensayo de tracción 1% reducción de espesor.

Tabla A.2. Propiedades Mecánicas, 1% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
1%	351	460	36.8

I.3 Acero al carbono 2% de deformación

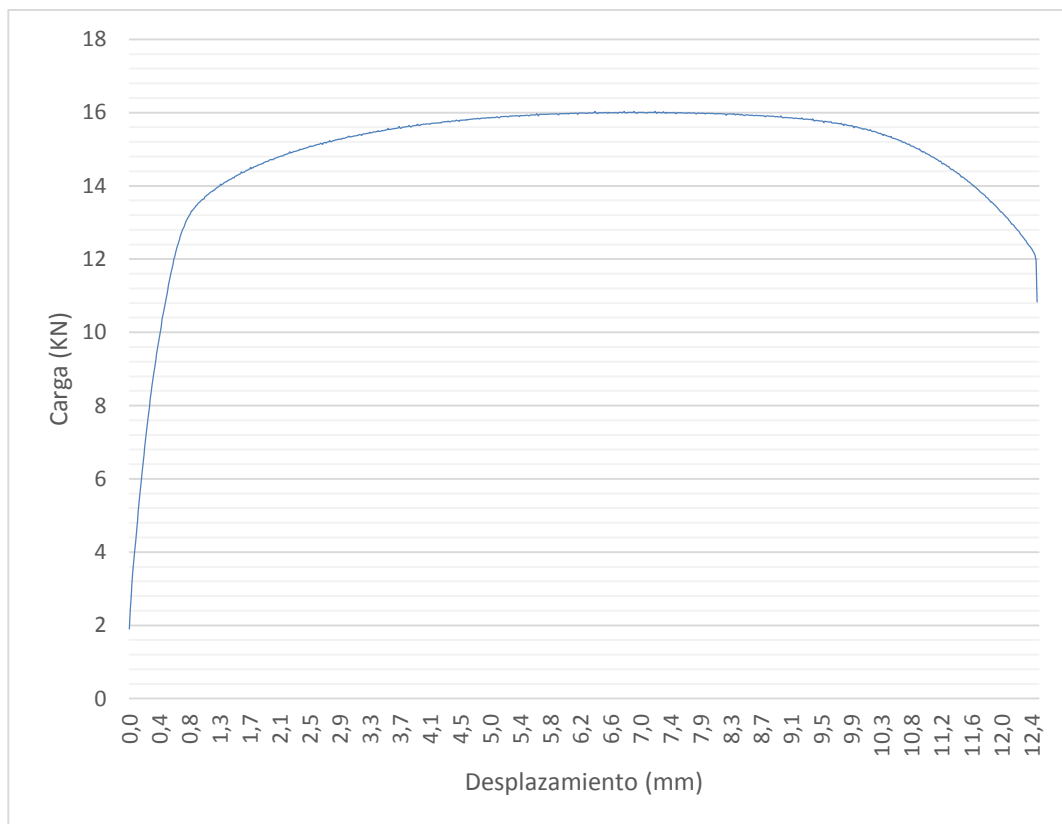


Figura A.3. Gráfica de ensayo de tracción 2% reducción de espesor.

Tabla A.3. Propiedades Mecánicas, 2% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
2%	392	465	33.4

I.4 Acero al carbono 3% de deformación

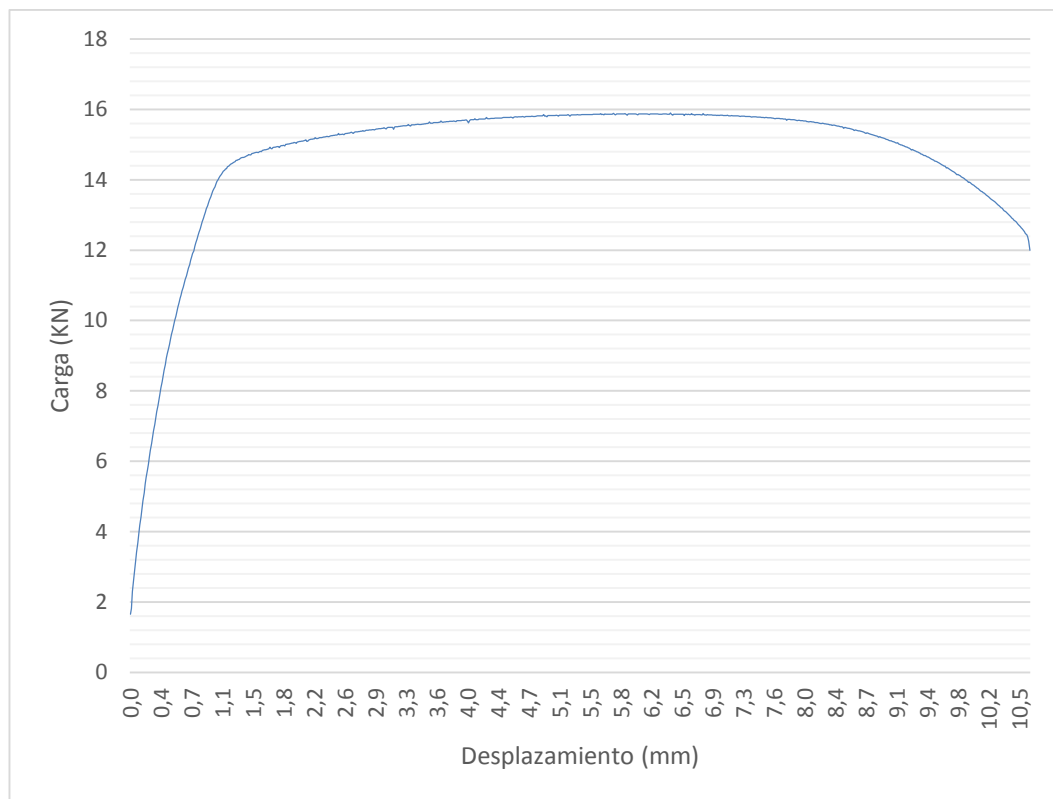


Figura A.4. Gráfica de ensayo de tracción 3% reducción de espesor.

Tabla A.4. Propiedades Mecánicas, 3% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
3%	419	457	31.2

I.5 Acero al carbono 4% de deformación

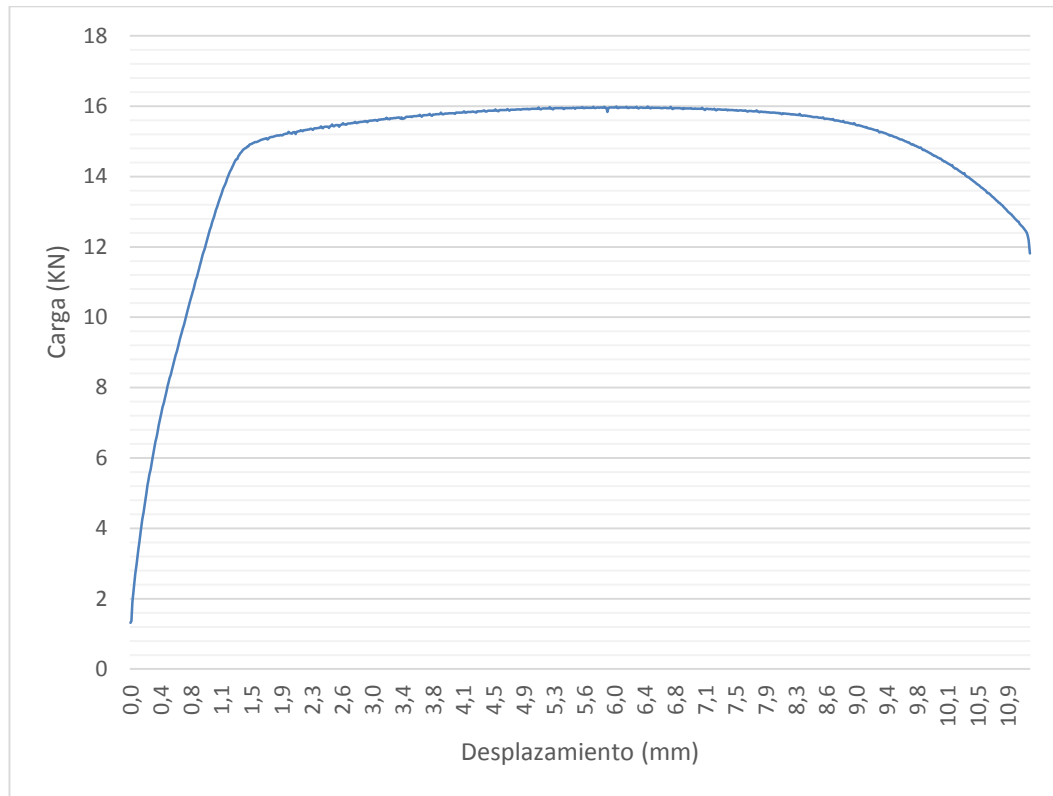


Figura A.5. Gráfica de ensayo de tracción 4% reducción de espesor.

Tabla A.5. Propiedades Mecánicas, 4% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
4%	439	467	30.4

I.6 Acero al carbono 5% de deformación

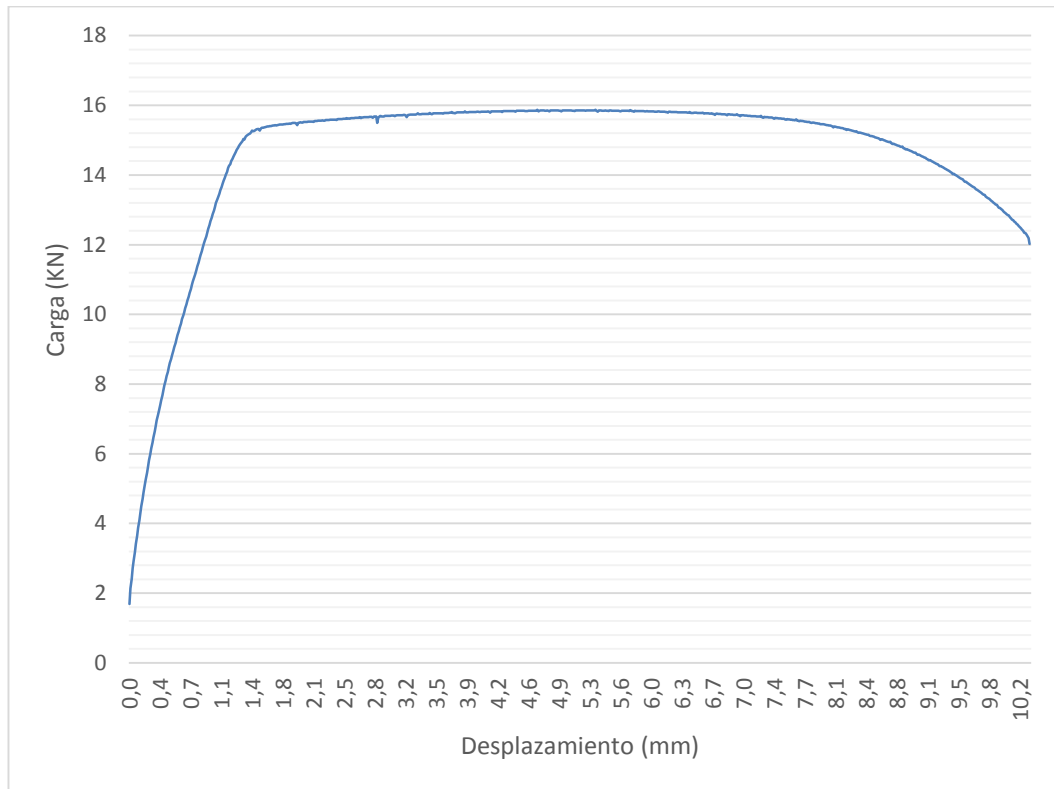


Figura A.6. Gráfica de ensayo de tracción 5% reducción de espesor.

Tabla A.6. Propiedades Mecánicas, 5% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
5%	453	471	30.4

I.7 Acero al carbono 10% de deformación

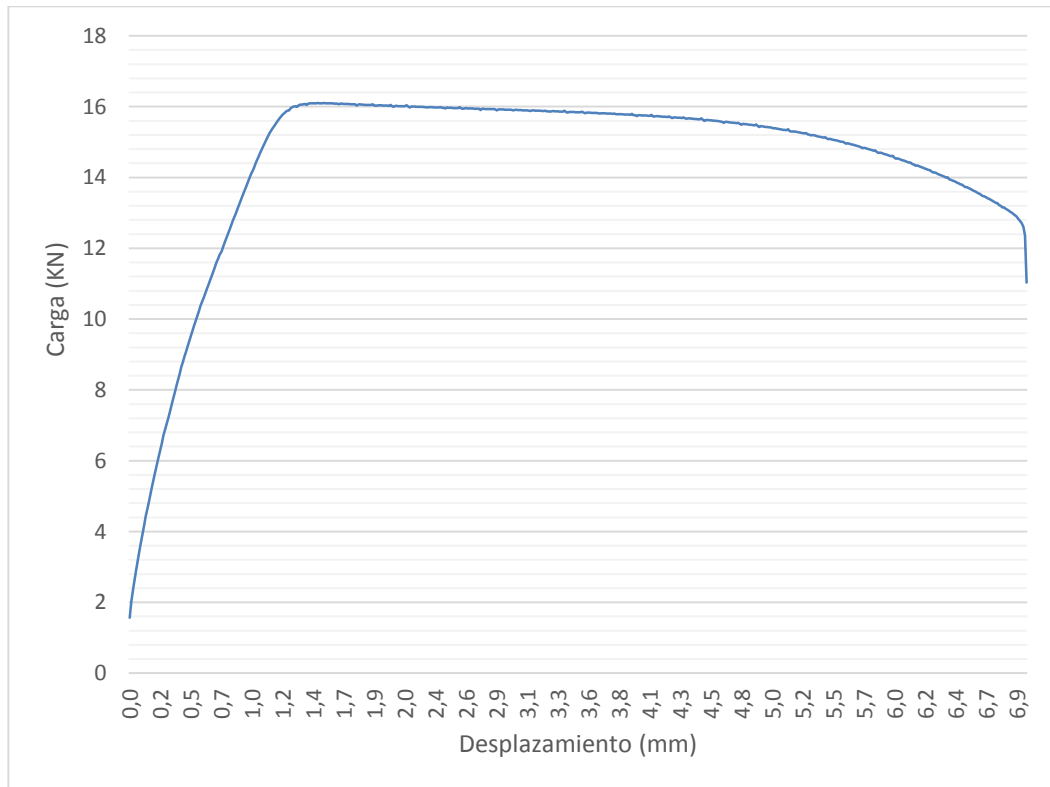


Figura A.7. Gráfica de ensayo de tracción 10% reducción de espesor.

Tabla A.7. Propiedades Mecánicas, 10% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
10%	502	503	21.8

I.8 Acero al carbono 15% de deformación

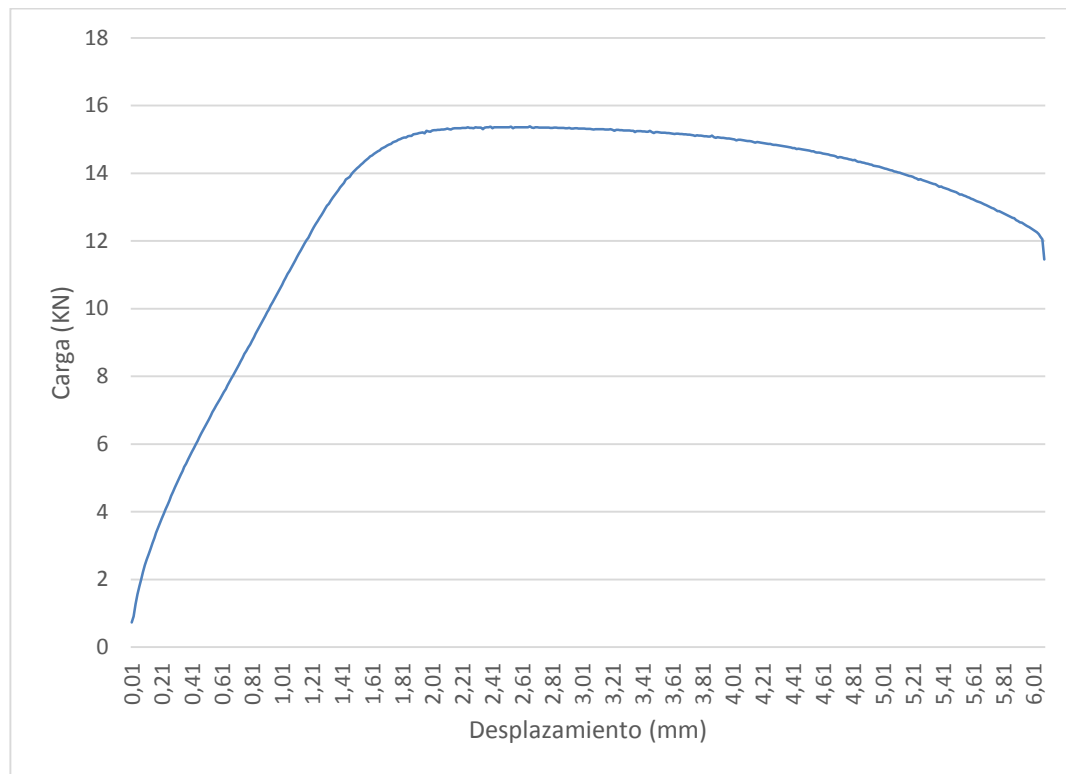


Figura A.8. Gráfica de ensayo de tracción 15% reducción de espesor.

Tabla A.8. Propiedades Mecánicas, 15% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
15%	499	520	17.7

I.9 Acero al carbono 20% de deformación

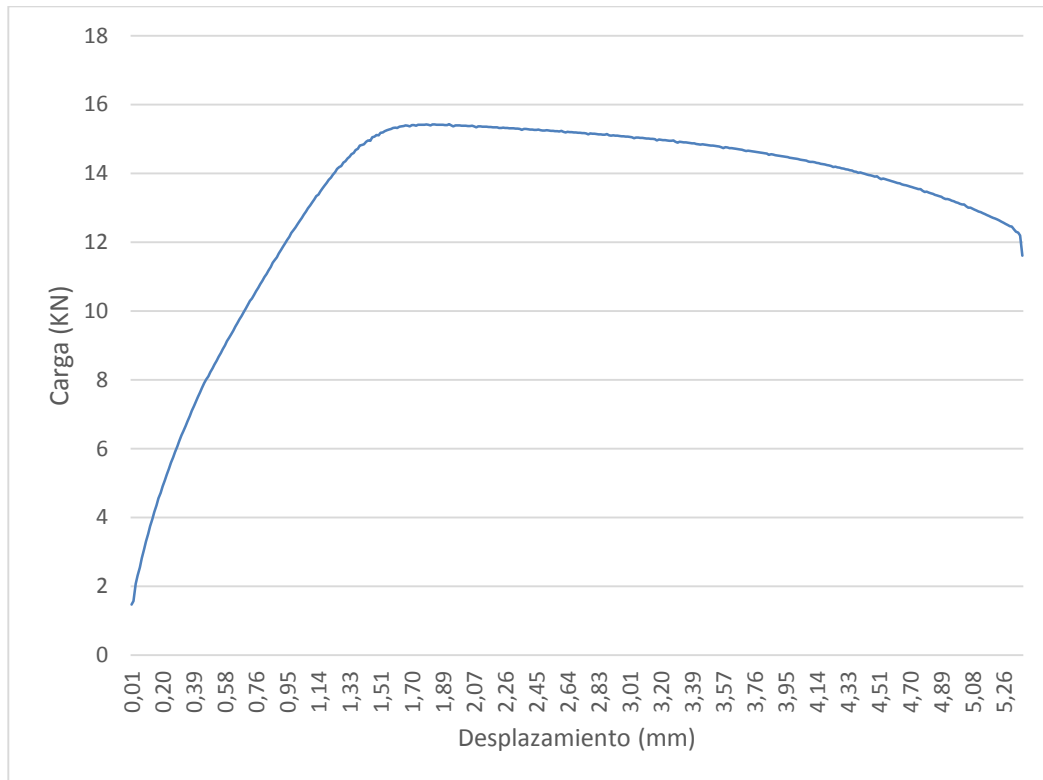


Figura A.9. Gráfica de ensayo de tracción 20% reducción de espesor.

Tabla A.9. Propiedades Mecánicas, 20% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
20%	533	542	16.6

I.10 Acero al carbono 25% de deformación

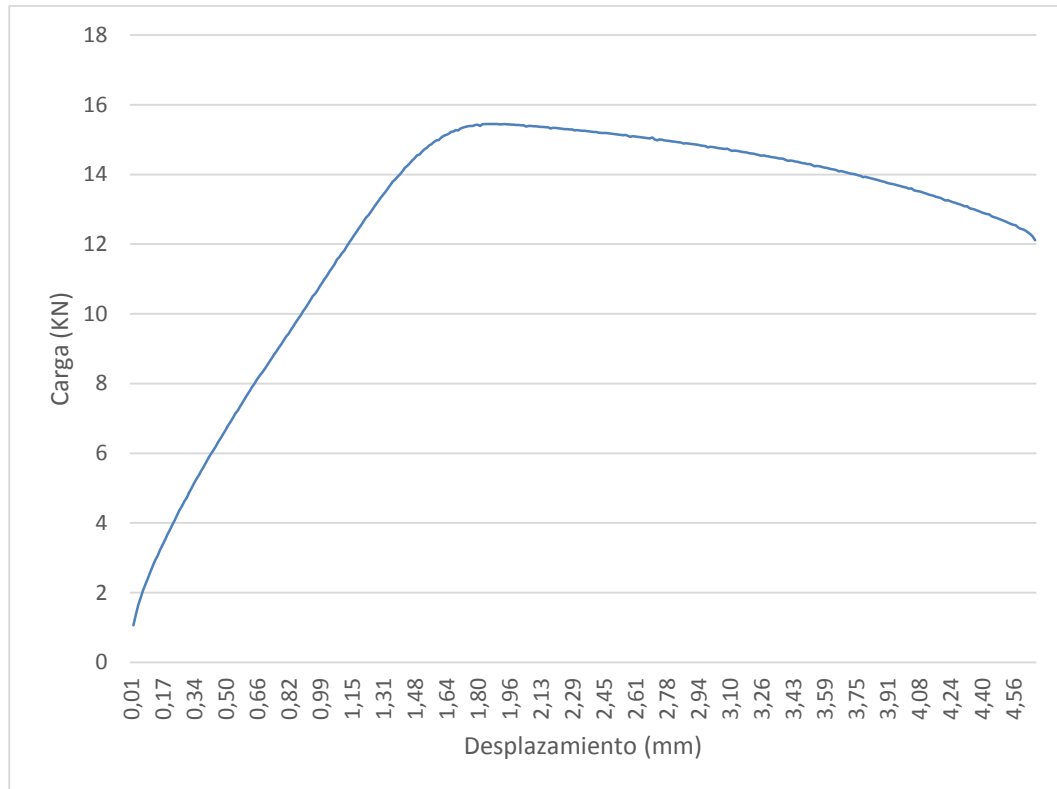


Figura A.10. Gráfica de ensayo de tracción 25% reducción de espesor.

Tabla A.10. Propiedades Mecánicas, 25% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
25%	574	577	13.9

I.11 Acero al carbono 30% de deformación

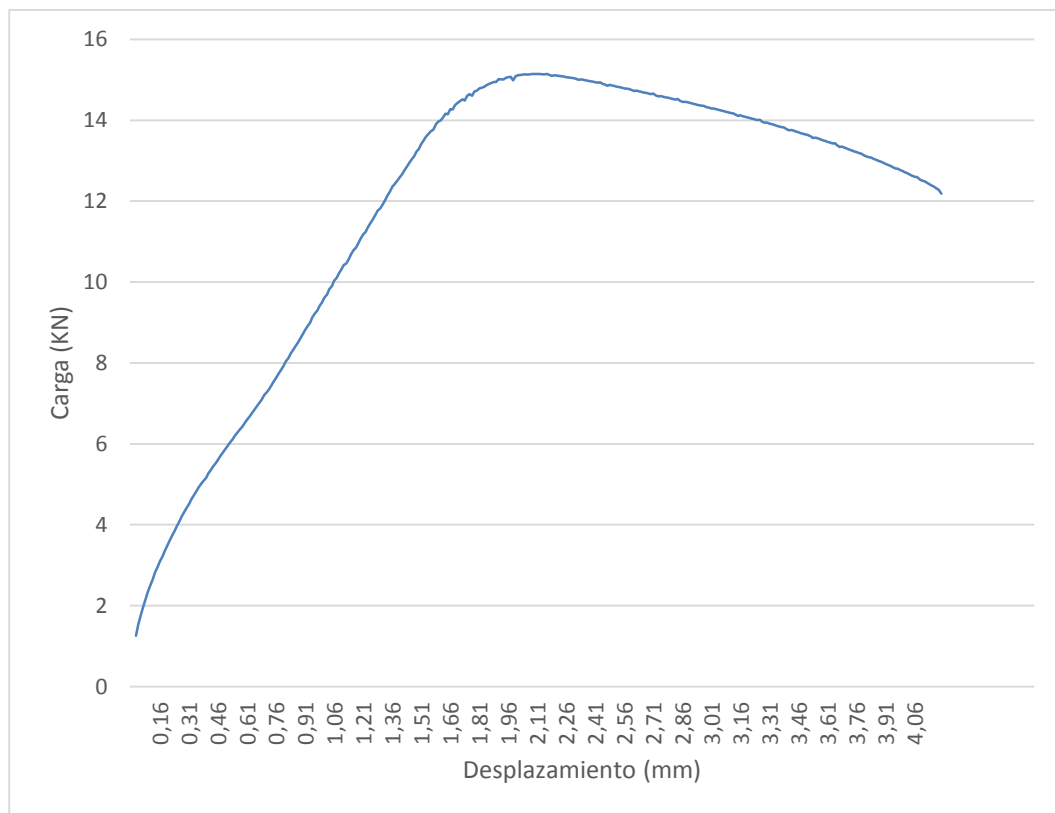


Figura A.11. Gráfica de ensayo de tracción 30% reducción de espesor.

Tabla A.11. Propiedades Mecánicas, 30% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
30%	595	603	12.0

I.12 Acero al carbono 35% de deformación

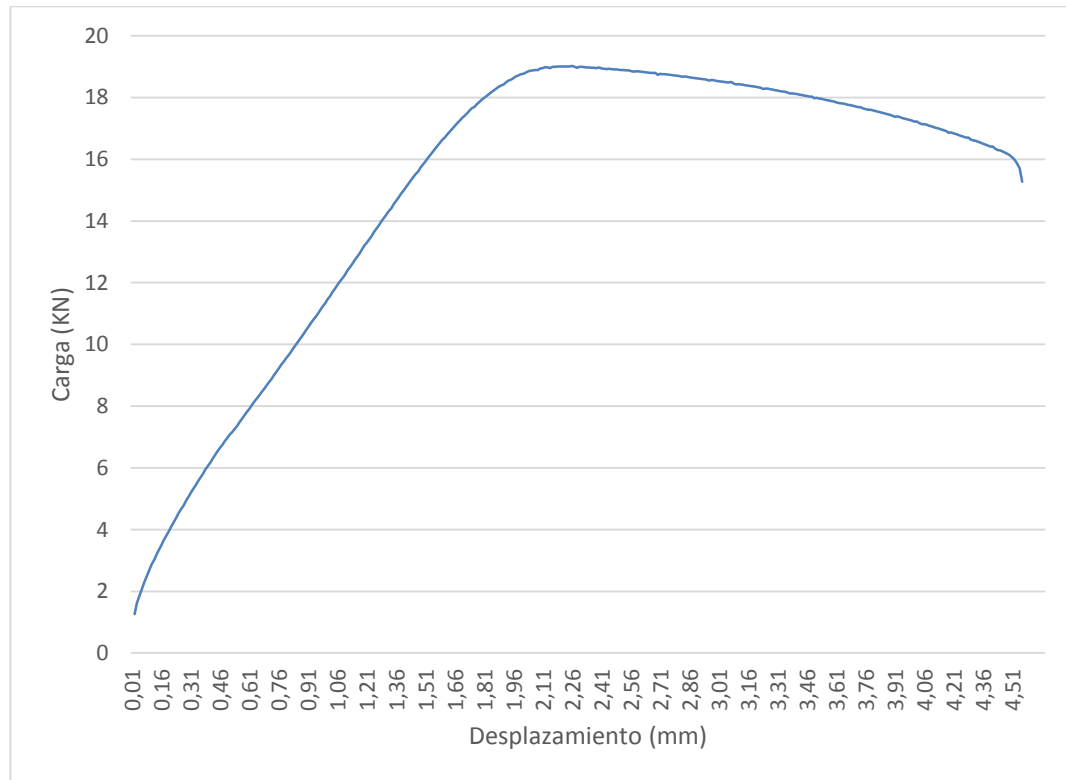


Figura A.12. Gráfica de ensayo de tracción 35% reducción de espesor.

Tabla A.12. Propiedades Mecánicas, 35% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
35%	587	598	13.7

I.13 Acero al carbono 40% de deformación

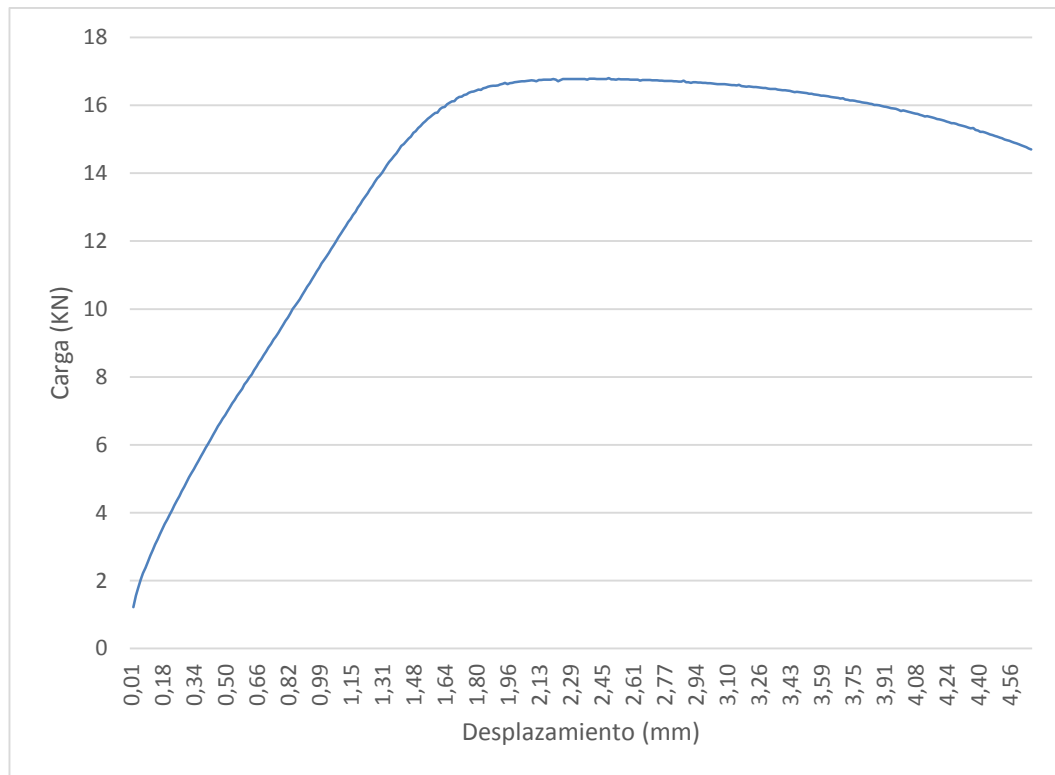


Figura A.13. Gráfica de ensayo de tracción 40% reducción de espesor.

Tabla A.13. Propiedades Mecánicas, 40% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
40%	562	592	14.3

I.14 Acero al carbono 45% de deformación

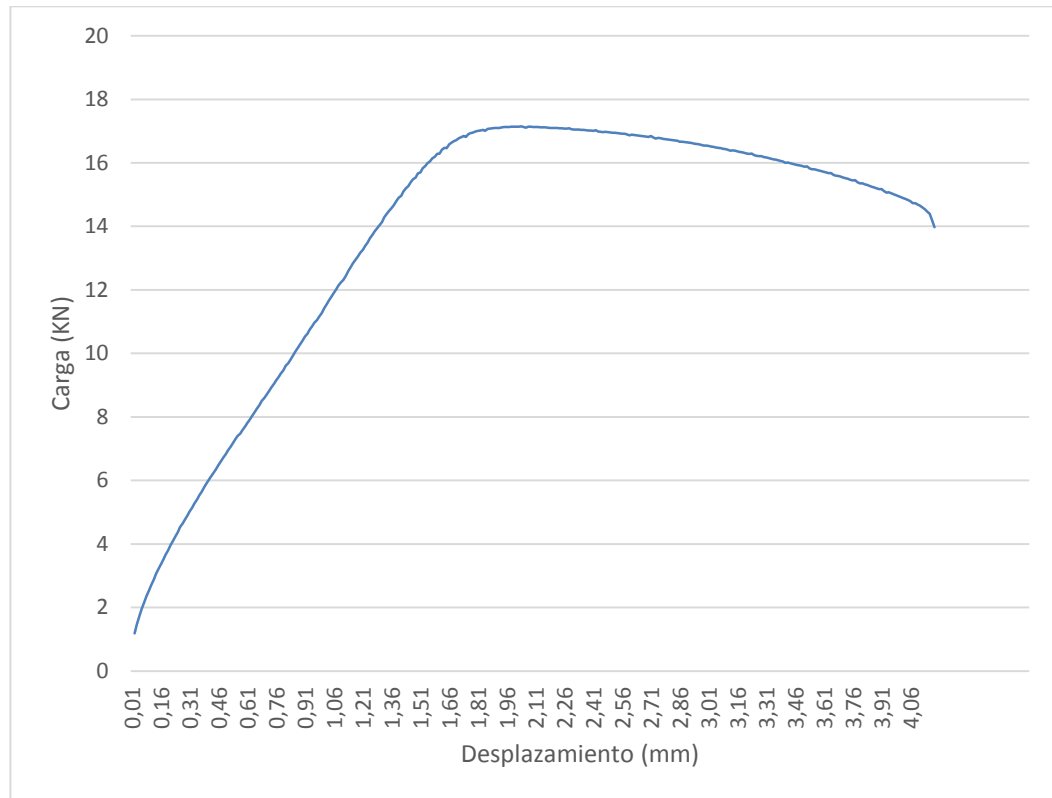


Figura A.14. Gráfica de ensayo de tracción 45% reducción de espesor.

Tabla A.14. Propiedades Mecánicas, 45% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
45%	605	630	13.6

I.15 Acero al carbono 50% de deformación

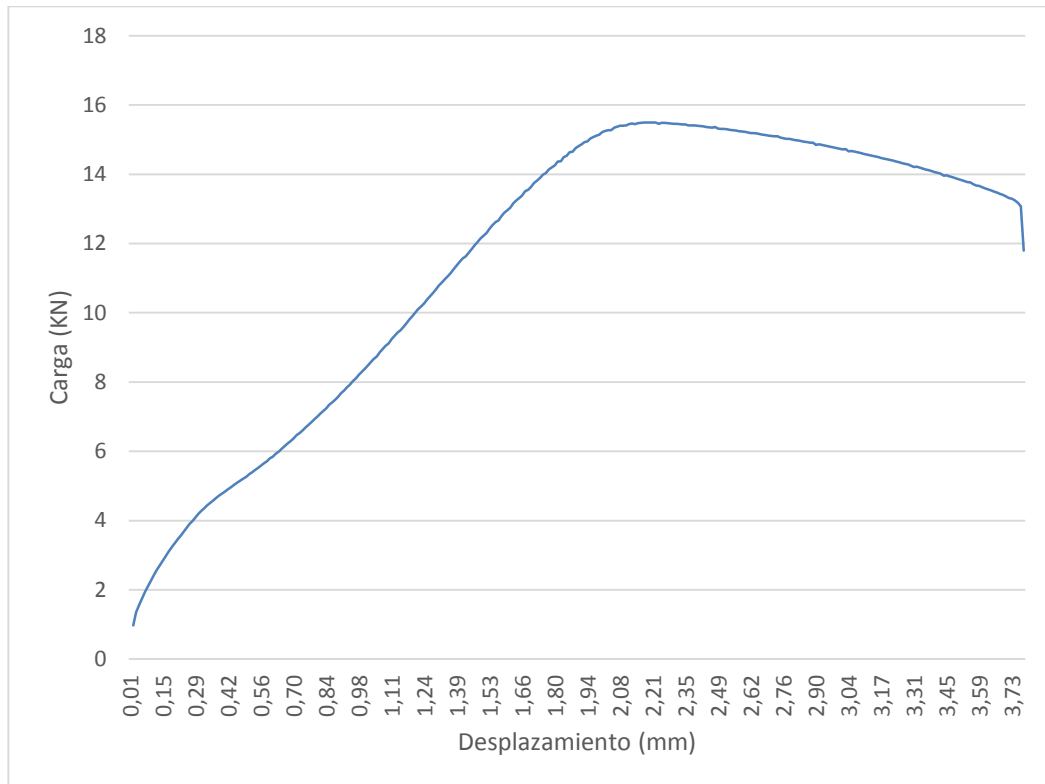


Figura A.15. Gráfica de ensayo de tracción 50% reducción de espesor.

Tabla A.15. Propiedades Mecánicas, 50% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
50%	644	653	6.3

I.16 Acero al carbono 55% de deformación

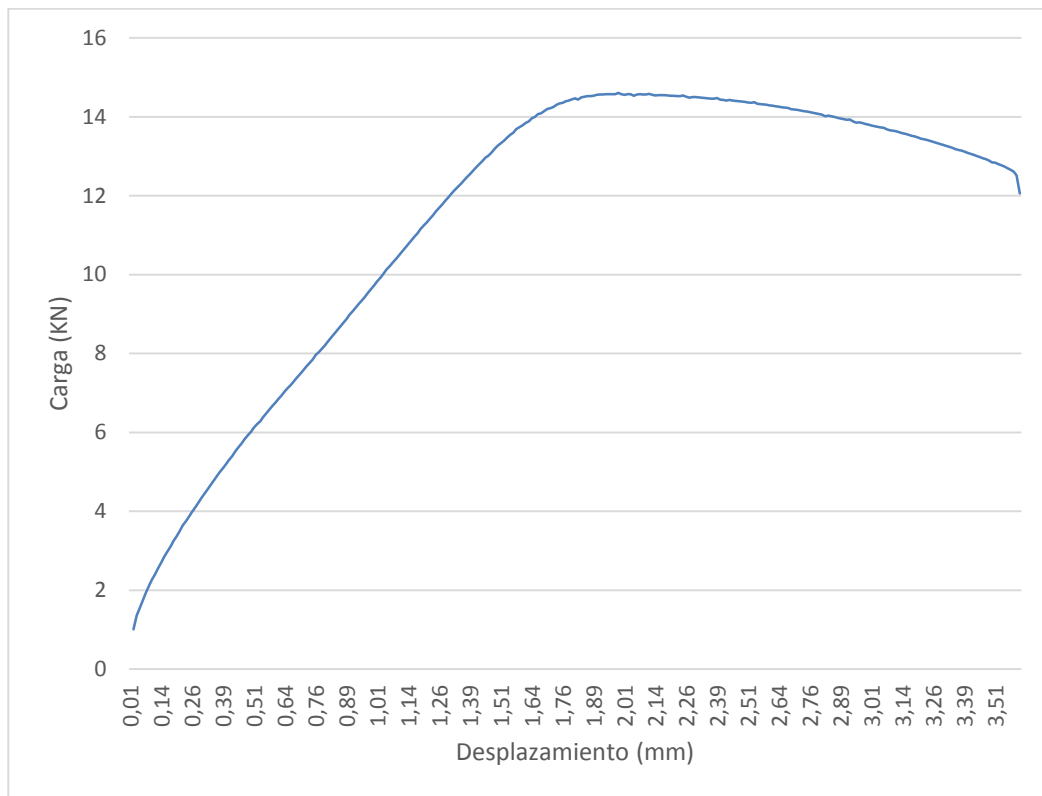


Figura A.16. Gráfica de ensayo de tracción 55% reducción de espesor.

Tabla A.16. Propiedades Mecánicas, 55% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
55%	627	647	4.8

I.17 Acero al carbono 60% de deformación

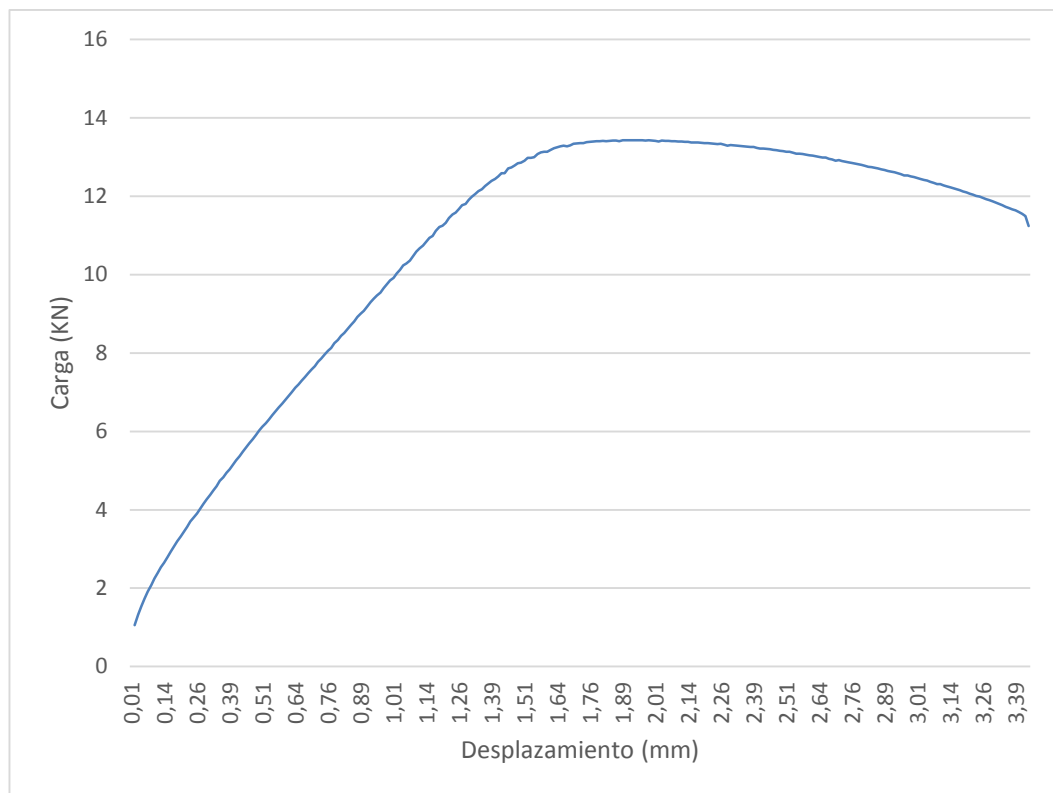


Figura A.17. Gráfica de ensayo de tracción 60% reducción de espesor.

Tabla A.17. Propiedades Mecánicas, 60% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
60%	644	670	5.7

I.18 Acero al carbono 65% de deformación

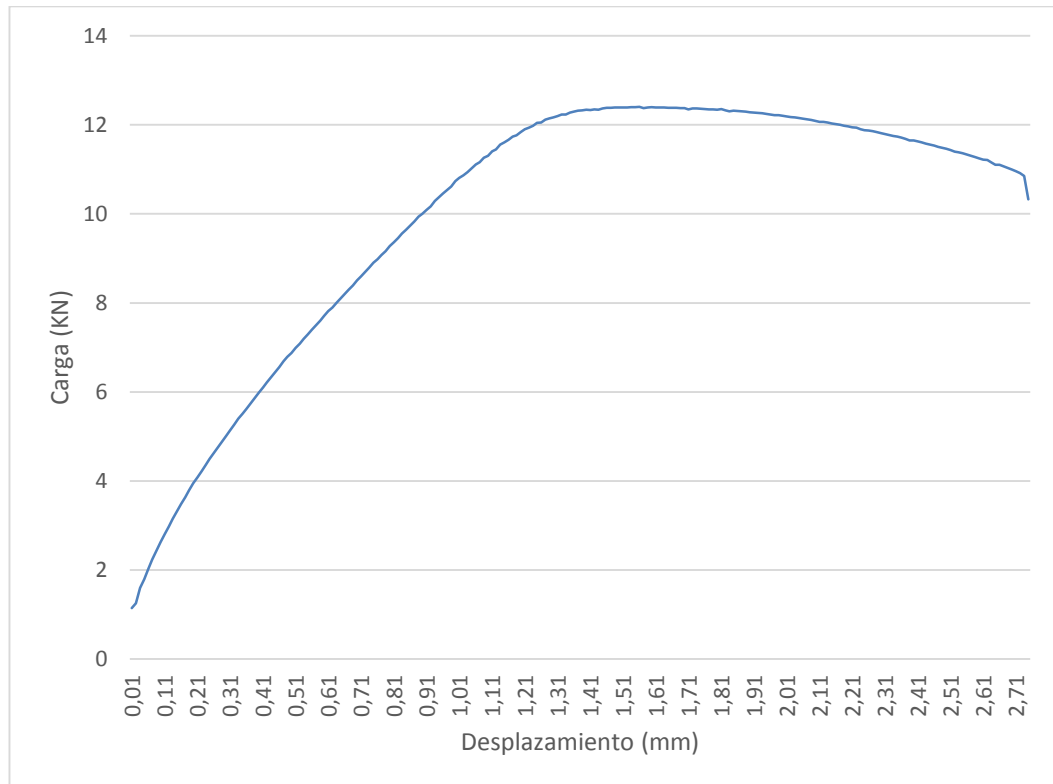


Figura A.18. Gráfica de ensayo de tracción 65% reducción de espesor.

Tabla A.18. Propiedades Mecánicas, 65% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
65%	678	710	5.9

I.19 Acero al carbono 70% de deformación

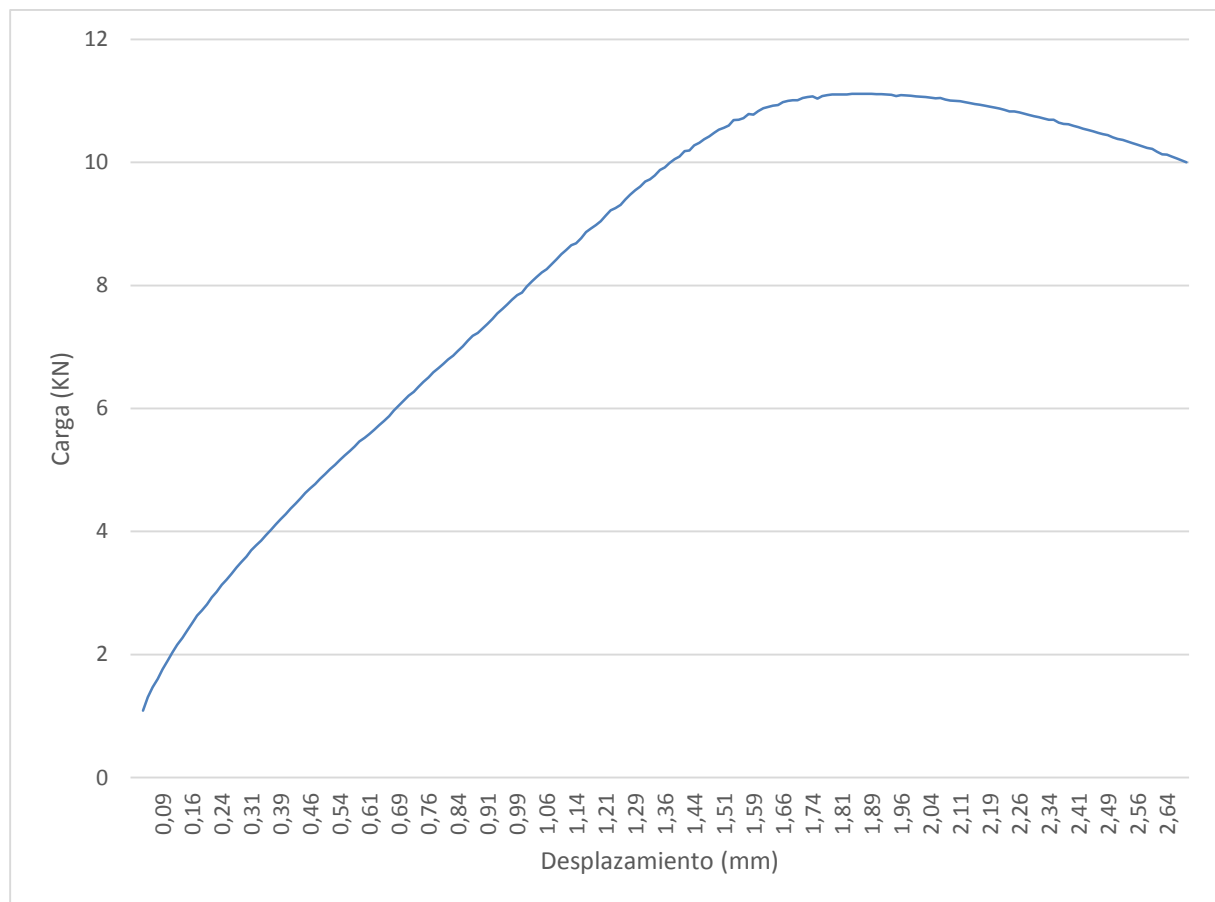


Figura A.19. Gráfica de ensayo de tracción 70% reducción de espesor.

Tabla A.19. Propiedades Mecánicas, 70% de reducción de espesor.

Deformación	LE (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
70%	694	720	4.4